

制御基礎講座 3

プログラム学習による

# 電子制御

松下電器 製造・技術研修所編著

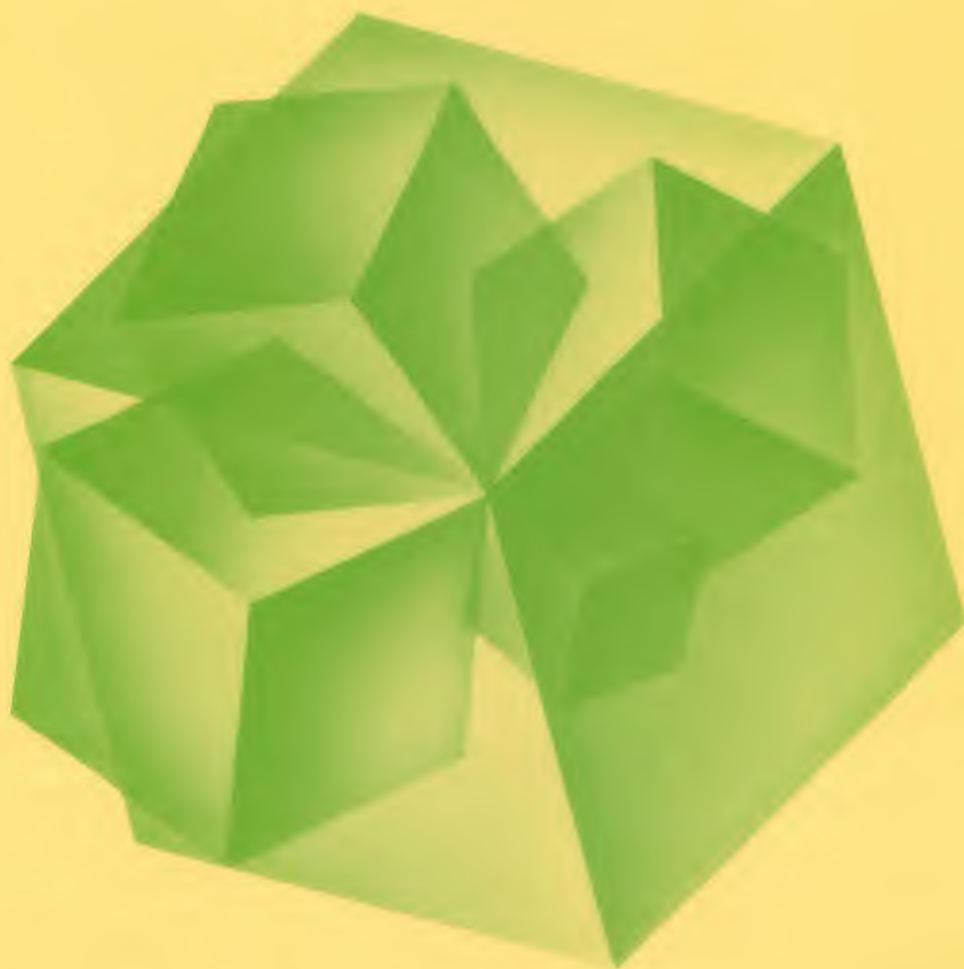


イラスト  
カバ  
1  
三宅政光  
松下隆一

---

制御基礎講座 3

---

プログラム学習による

---

# 電子制御

---

松下電器 製造・技術研修所 編 著

---

---

松下電器産業株式会社 発行

---

科学情報社 製作

---









プログラム学習による

# 電子制御

松下電器 製造・技術研修所 / 編著

発行 / 松下電器産業株式会社

製作 / 科学情報社



## 「家庭教師シミュレーション」を導入した 新しいプログラム学習書

「猫に小判」あるいは「馬の耳に念仏」ということわざがある。これらは、どんなにありがたいものを与えてもそれに興味をといるか、自分から聴こうとする意欲がなければ役には立たないということを、猫や馬にたとえてたくみに表現している。学習も正にそうであって、学習者がその学習に興味をもたなければ、いかに優れた内容のものでも「猫に小判」となってしまう。

つまり、学習意欲がなければ、すなわちやる気がなければ学習はもともと成り立たないわけである。

ところで、はじめから学習者が意欲をもっている場合にはよいが、学習を始めてから興味をもちだすという場合もある。学校教育の場合には、その成り立ちからみても後者の場合に相当する。そこで教師は、あらゆる「てれんでくだ」を凝らして学習者の意欲をかりたてようとするわけである。

さて、プログラム学習書はもともと自学自習をたてまえとしているので、意欲のないものには不向きとされていた。今回、われわれは従来のプログラム学習書に教育工学的な検討を加え、これを改革して、世界でもめずらしい新しい形式のプログラム学習書を編みだした。

それは名づけて

「家庭教師シミュレーション形式」

という。この形式は従来のプログラム学習書と全く同じであるが、異なるのはその解答欄である。

ここには、ふつうの解答のほかに、何人かの「家庭教師のことば」が記載されている。あるいは叱ったり、時にほめたり、場合によっては学習者の立場に立って共感をしたり、あたかも学習者のまわりを数人の先生や仲間がとりまいて授業をしているような錯覚を起こさせるほどである。

この形式は、教育工学的には学習者に対するフィードバックあるいは K. R. (Knowledge of Results) の手法である。

東京工業大学名誉教授  
神奈川大学教授

末 武 国 弘





## 発行にあたって

この制御基礎講座は、以前に松下電器工学院から電気基礎講座として発行し、たいへん好評をいただいたプログラム学習書の続刊として発行いたしました。

当、製造・技術研修所は、当社々内の主として製造系・技術系社員の教育訓練を専門的に実施する企業内教育機関で、時代の要請に応じ、あるいは社内の要請に従って教育訓練の企画・実施を行っています。

しかし、当社では学習課題に対して、分散した事業場に多数の対象者を抱え、一挙に教育訓練を施すことができないため、各人が自学自習できるものについては学習用の教材を提供し、助成を行っています。

その一つとして生まれたのがプログラム学習書のシリーズです。

この教材は、当所において実施した講義の繰り返しをベースとし、その改善への取り組みを独自のプログラム学習書編集方式により集大成したもので、わかりやすい説明、展開をモットーに図や写真をふんだんに採用して編集しました。

制御技術は、今日の生産現場の自動化、省力化、あるいは製品機能の高度化が進む中で、その根本となるもので、これらに関連ある仕事に従事する人々にとっては是非必要なものであり、社内での利用にとどめず、広く各位にご利用いただければと思い、出版いたしました。

いたらぬ点につきましては、ご指導、ご叱正たまわれれば幸いです。

編 著 者 代 表



## この本の特色とねらい

1. この本は、それぞれの項目が次のように構成されています。

- ① 学習の目標
- ② 学習の概要
- ③ 学習の展開
- ④ 練習問題

2. 「学習の目標」には、その項目で学習する学習目標が簡潔に記述してあります。

3. 「学習の概要」には、その項目で学習する内容をまとめて、簡潔に記述してあります。学習の整理・まとめに使用することもできます。

4. 「学習の展開」には学習内容がプログラム学習の教育技法によって展開されています。解答欄には、解答のほかに K.R.(Knowledge of Results) の手法を用いて学習意欲を高める教育工学的な「家庭教師のこたば」が記載されています。

5. 「練習問題」は、学習の展開で学習したことが十分に定着するよう幅広い内容とし、詳しい解答がついています。

6. 学習の展開が丁寧すぎる学習者とか、学校で一通り勉強した人が、社会に出て再教育の機会を得、もう一度学習する場合には、学習の概要と練習問題で学習する方法もとれます。

7. 集団一斉教育機関で教科書として使用する場合は、学習の概要に基づいて講義を進めることができます。

8. 企業内教育訓練機関で、自己啓発、OJT、通信教育などを行なう際、スクーリングや短期集合教育の時は、学習の概要に基づいて授業を行い、練習問題を用いて学習が成立したかどうかをチェックすることができます。

## この本の使い方

1. はじめて制御を学習する人は、「学習の展開」から始めて下さい。
2. 「学習の展開」は、プログラム学習の教育技法によって先生の講義と同じように展開されています。

別に添えてあるマスクで解答欄をかくし、答を見ないようにして、内容をよく読み、よく考えて\_\_\_\_\_の空白をうめるようにして下さい。

フレーム 1 →	1 この本は学習の概要、_____の展開、練習問題という順に構成されています。	学習
フレーム 2 →	2 学習の_____はその項目で学習する内容が簡潔に記述してあります。	概要
	3 学習の_____には、学習の概要がプログラム学習の教育技法によってわかりやすく展開されています。	展開
	4 練習問題は、学習の_____で学習したことが十分定着するように、幅広い内容とし、詳しい解答がついています。	展開

3. フレームの中をよく読んで、\_\_\_\_\_の空白に入れる答がわかったらそれをノートなどに記入します。
4. 一つのフレームの中の解答がすんだら、そのつどマスクをずらして解答欄の答と見比べ、正誤を確認します。
5. 答が正しければ、次のフレームに進みます。もしまちがっていたらもう一度よく読み直し、正しい解答がつくれるまで考えてみます。  
速く進む必要はありません。一つ一つのフレームを十分理解しながら進むことが大切です。
6. 最後に章末の「練習問題」を解答し、学習が成立したかどうかを確かめて下さい。

## 目 次

1. 電子制御と検出器.....	1
2. 電子制御の構成とトランジスタ.....	23
3. 電 圧 増 幅.....	47
4. 電 力 制 御.....	71
5. ON-OFF制御とシュミット・トリガ.....	97
6. サイリスタとON-OFF制御.....	121
7. 位 相 制 御 (I).....	147
8. 位 相 制 御 (II).....	171
9. オペアンプと比較機能.....	203
10. オペアンプの活用法(I).....	229
11. オペアンプの活用法(II).....	255
12. 応 用 回 路.....	277

学習者のみなさん！

あなたはいま、たいへん立派な何人もの家庭教師と仲間にとりまかれて、しかもなお、その先生方に気がねすることなく、マイペースで勉強ができるわけです。

疲れたらコーヒーを飲んでもよいし、音楽をきいてもよいのです。  
(トイレに行くときだって“失礼！”と言わなくてもすむのです！)  
ひとつ王子様になったつもりで勉強を進めてください。





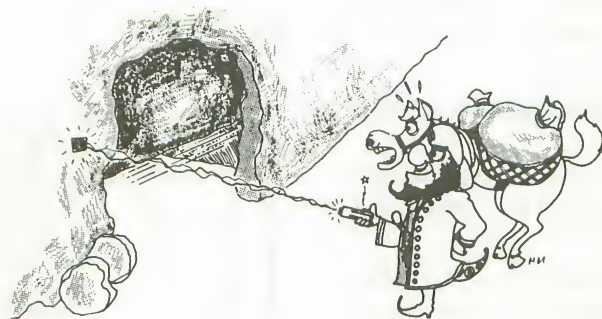


# 1. 電子制御と検出器

## 学習の目標

1. 電子制御がどのようなところで活用されているかを知る。
2. 制御を行ううえでの検出器の必要性がわかり、どのような検出器が一般に用いられているかを知る。
3. つぎの検出器の基本動作、特徴、および用途を知り、第2章以後の学習に対する予備知識を得る。

- |            |            |
|------------|------------|
| ① サーミスタ    | ② 熱電対      |
| ③ CdS      | ④ ホトダイオード  |
| ⑤ ホトトランジスタ | ⑥ ポテンショメータ |
| ⑦ 差動変圧器    |            |



ヒラケゴマはもう古い……

## 学習の概要

### 1. 電子制御とは

- (1) 半導体素子を利用した制御を総称して電子制御といっています（電子制御にはデジタル IC を利用したものもありますが、これについては「無接点シーケンス制御」を参照してください）。



トランジスタ



サイリスタ

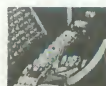
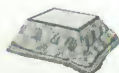


オペアンプ

- (2) 私たちの身近なところでも、家庭電化製品や設備の制御、省力化装置などで電子制御が利用されています。



電気コタツの温度制御



検査装置



### 2. 検 出 器

検出器とは、温度や光の強さや物体の位置などを、それに対応した電気量に変換するものです。

電子制御で利用される検出器の代表的なものには、つぎのようなものがあります。

- ① 温度の検出……サーミスタ、熱電対
- ② 光の検出……CdS、ホトダイオード、ホトトランジスタ
- ③ 位置の検出……ポテンショメータ、差動変圧器

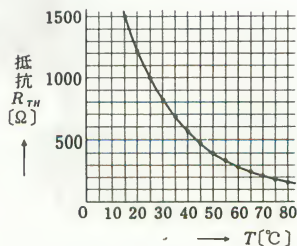
### 3. サ ー ミ ス タ

温度を抵抗値に変換する検出器です。

- (1) 温度が上昇すると抵抗値は減少し、温度が低下すると抵抗値は増加します。
- (2) 小形で価格も安いいため、一般の温度検出器として広く用いられています。



- (3) 一般にサーミスタには25[℃]のときの抵抗値が表示されています。



サーミスタ (1kΩ) の特性

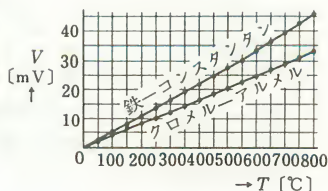
#### 4. 熱電対

温度を電圧に変換する検出器です。

- (1) 温度固定端子を一定温度に保つようにしておくと、測温端子の温度に応じた電圧が発生します。
- (2) 一般には、サーミスタなどが使えない高温の温度検出器として用いられます。



熱電対の外観



熱電対の特性

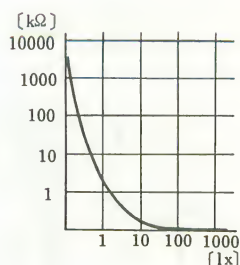
#### 5. CdS

光の強さを抵抗値に変換する検出器です。

- (1) 光が強くなると抵抗値が減少し、光が弱くなると抵抗値が増加します。
- (2) 感度が高く、取り扱いやすいためよく用いられますが、応答速度がおそいという欠点があります。



CdSの外観



CdSの特性

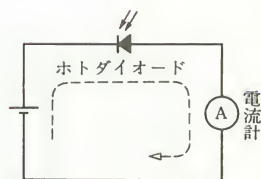
#### 6. ホトダイオード (ホトトランジスタ)

光の強さを電流に変換する検出器です。

- (1) 図のように接続しておくと、光が強くなると電流が増加し、光が弱くなると電流が減少します。
- (2) 感度の点ではCdSより劣りますが、応答速度と精度はよい特性をもっています。



ホトダイオードの外観



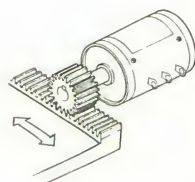
#### 7. ポテンシオメータ

可変抵抗によく似たもので、摺動部を位置検出したい部分に取りつけておくことによって位置の検出をするものです。

機械的な構成になっているため、耐久性が要求される位置の検出器としては、あまり適していません。



ポテンシオメータの外観



## 8. 差動変圧器

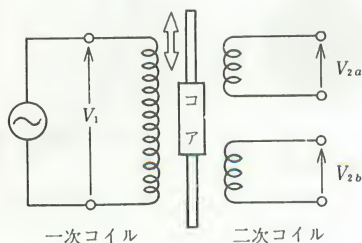
(1) 差動変圧器は図のような外観をしたもので、変圧器の一種です。

(2) 差動変圧器は図のように一次コイルと、二つの同一特性の二次コイル、および可動コアで構成されており、可動コアを検出したい部分に取りつけておくことによって位置の検出をするものです。

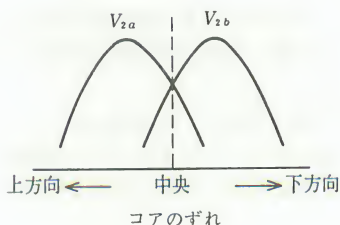


① 図 a のように一次コイルに電圧を加えると、二次コイルにはコアの位置に応じて図 b のような電圧が現れます。

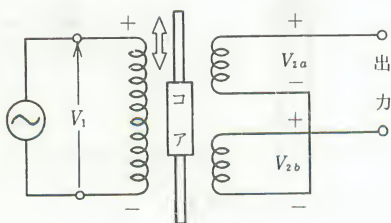
② 図 c のように二次コイルを接続しておくと、出力電圧  $V_o$  は  $V_o = V_{2a} - V_{2b}$  となり、図 d のようになって、コアの中央部からの変位を高感度で検出できます。



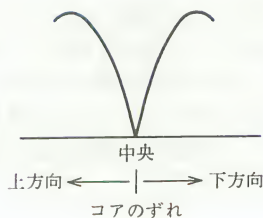
(図 a)



(図 b)



(図 c)



(図 d)



## 学習の展開

1 みなさんは、つぎのような部品を見たことがありますか。

これらの部品は、みなさんがこれから学習する電子制御の中心的な役割を果たす半導体素子です。

このような半導体素子は、私たちの目に直接触れることはあまりありませんが、家電製品や工場の自動化設備などの制御に数多く活用されています。



トランジスタ

サイリスタ

オペアンプ

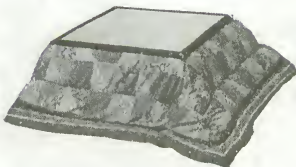
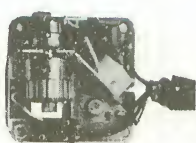
さあ スタートだノ

「この学習が終ると  
半導体にフーイ人にな  
ってはいはずだよ」

よーし  
ガレバルぞノ

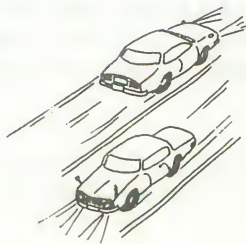
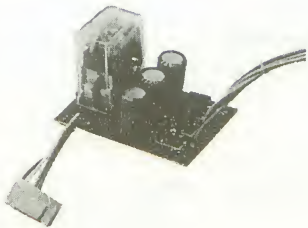
2 そこで、具体的な電子制御の学習にはいる前に、このような半導体素子を活用した制御について、私たちの身近にあるものをさし紹介しておきましょう。

図のプリント基板に組みこまれている回路は、電気コタツの温度を適温にコントロールしようとする温度制御回路です。



「このような回路が  
あなたにもつくれる  
ようになりますヨ  
お楽しみにネ」

3 図のプリント基板は、対向車が近づくと自動的にヘッドライトを切り換えて、相手がまぶしくないようにコントロールするためのものです。

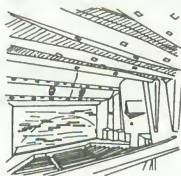


フーン  
これは 便利だナァー

「事故も少なくなりやすネ…」

ヨーシ 勉強して作っぞ!

4 また、このプリント基板は電源をONにすると徐々に明るくなり、OFFにすると徐々に暗くなるというコントロール装置で、映画館の照明などでは、このような装置がよく使用されています。



ホー  
こんなこともできるの？

「今や 電子制御は  
可能だよ！」

5 これは乾電池の製造工程で使われているもので、乾電池の電圧を自動的にチェックし、良品か不良品かの判定をする装置です。

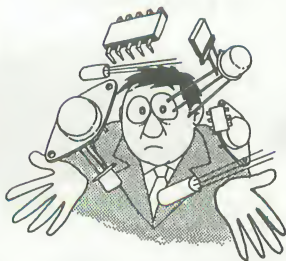


「勉強したら 仕事にも  
活用してね」

ハーイ  
わかりました

6 このように、私たちの身近なところでも、半導体素子を活用した制御が次々に登場しています。

このような半導体素子を利用した制御を総称して電子制御といいます（半導体を用いた電子制御としては、このほかにもデジタルICを利用したものがありますが、この分野の学習については「無接点シーケンス制御」を参照してください）。




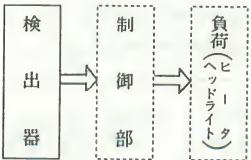
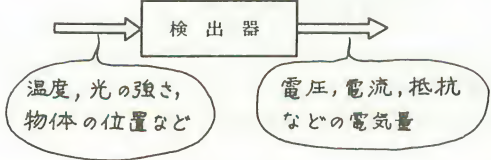
ナルホドホー  
わたしも 頑張らなきゃ...

7 それでは、これから半導体素子を利用した電子制御について、基本的なことから段階的に学習していくわけですが、具体的な制御の学習にはいる前に、その前段階として学習しておかなければならないことがあります。

電子制御の中心となる制御部には、トランジスタやICなどの半導体素子が用いられていますが、このような制御部だけでは制御を行わせることはできません。

「制御部については、  
次々章から じっくり  
学習していきます」



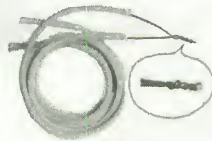
<p>8 たとえば、電気コタツの温度をコントロールする場合を考えてください。</p> <p>電気コタツの温度を適温にコントロールするには、まずコタツの温度が現在いくらになっているかを知らなければなりません。</p> <p>また、対向車がきたとき自分の車のヘッドライトを減光する場合も同じです。</p> <p>この場合も、対向車のヘッドライトの光をまず検知してやる必要があります。</p>	 <p>フン フン まずは 現状をしっかり 把握しなくてはナ……</p> <p>「そういうこと」</p>
<p>9 すなわち、このような制御をかけようとするとき、まずコタツの内部の温度やヘッドライトの光などを検知する必要があるわけです。</p> <p>このような働きをする部分を検出器といいます。</p> <p>制御部は、この検出器からの出力を受けてコタツのヒータや車のヘッドライトを操作します。</p> <p>そこで、この章では具体的な制御部の学習にはいる前に、まずこのような検出器についてしらべてみましょう。</p>	 <p>「人間でいえば 目や耳に 相当するものです」</p> <p>ハイ、ハイ、</p>
<p>10 検出器とは、温度や光の強さや物体の位置などを、それに対応した電気量に変換し、検知するものです。</p>	 <p>「このようなことから 検出器のことを変換器とも いっていますよ」</p> <p>電気量への変換器と いうことだな</p>
<p>11 このような検出器の代表的なものとして、つぎのようなものがあります。</p> <p>○温度の検出 → サーミスタ、熱電対</p> <p>○光の検出 → CdS、ホトダイオード、ホトトランジスタ</p> <p>○位置の検出 → ポテンショメータ、差動変圧器</p> <p>それでは、これらの検出器について、それぞれの特徴や用途などを順次みていくことにしましょう。</p>	<p>「性質や特徴を しっかりつかんで下さいヨ」</p> <p>ハイ わかりました</p>

## 12 温度の検出

電気コタツや電気毛布などの温度制御に用いられている温度の検出器として、つぎのようなサーミスタや熱電対があります。



サーミスタ



熱電対

## 13 サーミスタ (Thermistor)

サーミスタは、マンガンやニッケルの酸化物を混合してつくったもので、形も比較的自由につくれ、小形で価格も安く、一般の温度検出器として非常に多く用いられています。

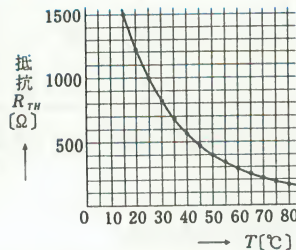
しかし、一般に最高使用温度が $120^{\circ}\text{C}$ 程度と低く、これ以上の温度範囲では、次に学習する熱電対が利用されます。

サーミスタは 低温用  
熱電対は 高温用です

「そういうこと」

14 サーミスタは一種の抵抗のようなもので、図のように温度( $T$ )が変化すると、その抵抗値( $R_{TH}$ )が変化するというものです。

すなわち、温度が上昇すると抵抗値は(ア) \_\_\_\_\_ くなり、温度が低下すると、反対に抵抗値は(イ) \_\_\_\_\_ くなります。



(ア) 小き (低)

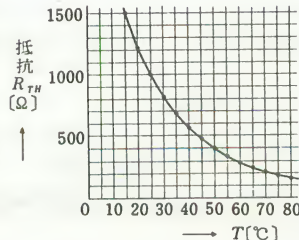
(イ) 大き (高)

15 図は常温  $25^{\circ}\text{C}$  の状態で  $1\text{ k}\Omega$  の抵抗値をもつサーミスタの特性です (サーミスタには  $25^{\circ}\text{C}$  における抵抗値が表示されています)。

つぎのような温度のとき、サーミスタの抵抗値はおおよそいくらになっていますか。

$20^{\circ}\text{C}$  → (ア) \_\_\_\_\_  $\Omega$

$40^{\circ}\text{C}$  → (イ) \_\_\_\_\_  $\Omega$



「わからない」

かんたん、かんたん

(ア) 約 1200

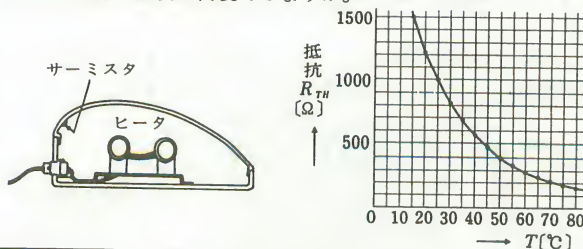
(イ) 約 550

16 このようなサーミスタを、検出したい部分に取りつけておくと、その部分の温度に応じてサーミスタの電気抵抗が変化します。

したがって、サーミスタの電気抵抗を測定することによって、その部分の温度を知ることができるわけです。

さて、図のようにサーミスタを取りつけると、その抵抗値が 400 [Ω] と測定されました。

コタツの内部の温度は何度でしょうか。



50 [°C]

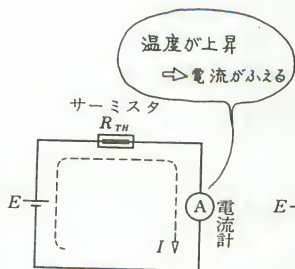
抵抗値を測定すれば  
温度がわかる  
というわけか

フン フン

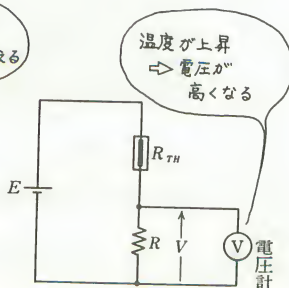
17 ところで、いまの場合はサーミスタの抵抗値によって温度を検出していましたが、このサーミスタを用いて図aや図bのような回路を組んでおくと、サーミスタの抵抗値変化を電流や電圧の変化として取り出すこともできます。

(1) 図aの場合 ⇒ 回路を流れる電流  $I$  は  $I = \frac{E}{R_{TH}}$  となり、 $R_{TH}$  が変化すると電流の値が変化する。

(2) 図bの場合 ⇒ 抵抗  $R$  の両端の電圧  $V$  は、 $V = \frac{R}{R + R_{TH}} E$  となり、 $R_{TH}$  が変化すると電圧の値が変化する。



(図 a)



(図 b)

ナールホド  
このようにすると  
温度の変化を電流や  
電圧の変化として  
取り出せるわけだ

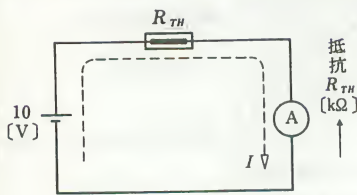
「そういうこと」

18 たとえば、図bのような特性をもったサーミスタを用いて、温度を電流に変換するために図aのような回路をつくりました。

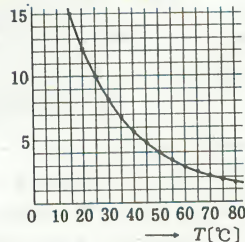
サーミスタの温度が25[℃]から50[℃]に変化したときの電流計の振れがどのようになるかみてみましょう。

サーミスタの周囲温度が25[℃]の場合は、サーミスタの抵抗値が(ア) [kΩ] になりますから、電流計の振れは(イ) [mA] となります。

また、50[℃]の場合は、サーミスタの抵抗値が(ウ) [kΩ] となりますから、電流計の振れは(エ) [mA] となります。



(図a)



(図b)

(ア) 10 (イ) 1

(ウ) 4

(エ) 2.5

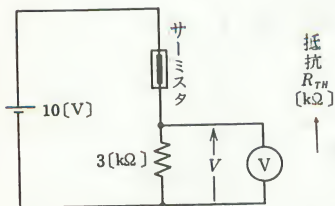
「どうです  
うまく 電流の変化として  
とり出せましたの」

19 こんどは、図bのような特性をもったサーミスタを用いて、温度を\_\_\_\_\_に変換する図aのような回路をつくりました。

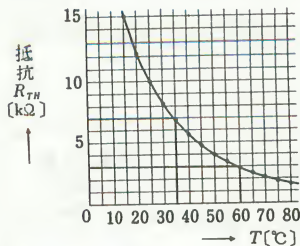
サーミスタの温度が35[℃]から60[℃]に変化したとき、出力電圧Vはどのようになりますか。

35 [℃] のとき →  $V =$  (ア) [V]

60 [℃] のとき →  $V =$  (イ) [V]



(図a)



(図b)

電圧

(ア) 3

(イ) 5

「電圧の変化 としても  
取り出すことが できてるジョ」

ハーイ

20 このように、サーミスタを用いると温度の変化を電流や電圧の変化として取り出すことができます。

一般には、この出力を制御部に入力として与え、温度の制御を行っています。

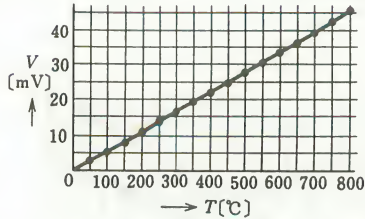
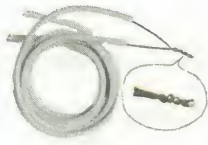
「さあ 次は  
熱電対ですヨ」



## 21 熱電対 (Thermocouple)

サーミスタは、温度の変化によって抵抗値が変化するというものですが、この熱電対は、温度によって電圧を発生するというものです。

図の特性からわかるように、温度が上昇するほど大きな電圧を発生するようになります。

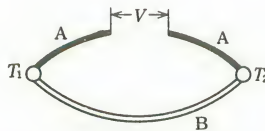


中に電池が入っていないかな

「次のフレームへ どうぞ」

22 熱電対は、材質の異なる2種類の導線A、Bを図のように接続したとき、その二つの接合部 $T_1$ と $T_2$ との間に温度差があると、その温度差に応じた電圧 $V$ が発生するというものです。

この現象は、発明者の名前をとってゼーベック効果といっています。



フェー

電池がなくても

導線をくっつけば、

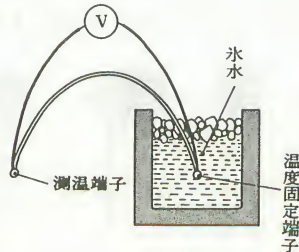
電圧が発生するんですか

「そうだよ

わずかな電圧 だけだね」

23 したがって、一方の接続点(温度固定端子)の温度を一定に保つようにし、他方(測温端子)を温度検出したい部分に取り付けると、この二つの端子間の温度差に応じた電圧が得られ、温度が検出できます。

ここで、温度を固定する接続点は、たとえば魔法ビンに氷水を入れてその中に入れておくとか、あるいは、これから学習する電子制御回路を用いて温度制御をかけて一定の温度に保つなどといった方法がとられます。



「氷水にしておくと、

氷が自然に溶けて、

温度固定端子は常に0℃に固定されるんですよ」

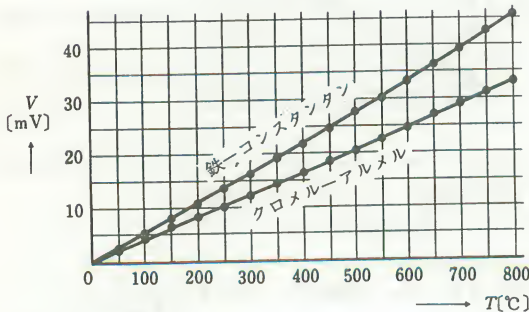
ナールホドナー

24 ところで、熱電対はこのように、一方の接続点がある基準の温度に固定しなければならないという不便さがあります。

したがって、一般にはサーミスタが使用され、電気炉などのような非常に高い温度を測定する場合にだけ熱電対が用いられています。

「サーミスタは  
最高 なん度まで使えたかな？」

25 図は、一般に市販されている熱電対について、それぞれの温度特性を示したものです（温度固定端子は 0 [°C] に固定したときの特性です）。



「ごく わずかな電圧でしやう」

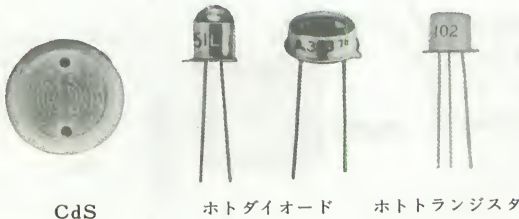
これなら 電池には  
使えないな

## 26 光の検出

私たちは日常、目で見たたり、耳で聞いたり、あるいは手で触れたりすることによって、物体の有無を知ります。

つまり、視覚や聴覚、触覚が人間の場合の検出器に相当するわけです。

光の検出器は、この人間の目に相当するもので、代表的なものに CdS やホトダイオード、ホトトランジスタなどがあります。



CdS

ホトダイオード

ホトトランジスタ

CdS は シー ゲー スと  
読むんですか

「そうです。

本当は 材料に使用している  
硫化カドミウム (CdS) の  
化学記号だけど、商品名  
のようになっているんです」



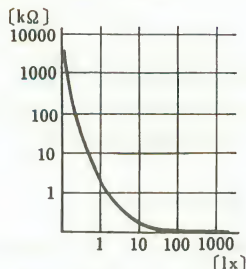
## 27 CdS (硫化カドミウム)

サーミスタも抵抗の一種のようなものですが、この CdS も同じようなものと考えることができます。

ただし、サーミスタが(ア)によって抵抗値が変化するのに対して、CdS は光の強さによって抵抗値が変化する点が異なります。

(1) 光が強くあたる  $\Rightarrow$  抵抗値は(イ) くなる。

(2) 弱い光があたる  $\Rightarrow$  抵抗値は(ウ) くなる。



(ア) 温度

(イ) 小さ

(ウ) 大き

光と温度のちがいは  
うわけだナ

「そうですぞ」

28 このように受ける光の強さによって CdS の抵抗値が変化する現象は、テストを用いて簡単に確かめることができます。

図のように、テストを用いて CdS の抵抗値を測定すると、昼間の明るい室内では抵抗値が非常に(ア)く、CdS を手で覆って光をしゃ断すると、抵抗値が非常に(イ) くなることがわかります。



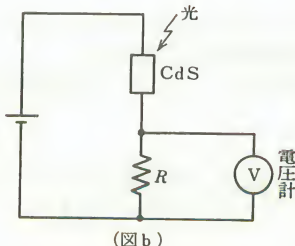
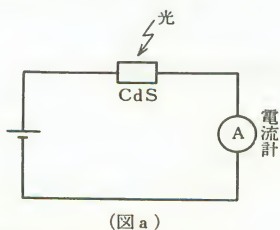
(ア) 小さ

(イ) 大き

おもしろそうだなア

「一度 実験してみよう  
いいですね」

29 したがって、サーミスタと同じように、CdS を用いて図 a や図 b のような回路を構成すれば、光の強さを電流や電圧の値として取り出せるようになります。



「サーミスタの場合が  
記憶に残っていますか」

バッチリ

30 この CdS は、他の光検出器に比べて感度が非常に高く、EEカメラやデイルイトスイッチなどに広く利用されています。



EEカメラ



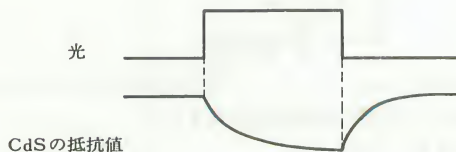
デイルイトスイッチ

デイルイト スイッチとは？

「街灯などの点滅で、よく利用されているもので、昼の明るいときは、スイッチが切れ、夜、暗くなると、それを検出して、ONになり街灯を点けるというものです」

31 ただ、この CdS の欠点は、応答速度がおそいということです。

図のように CdS に加えている光が変化しても、CdSの抵抗値はすぐに追従して変化できず、かなりの遅れが生じます。



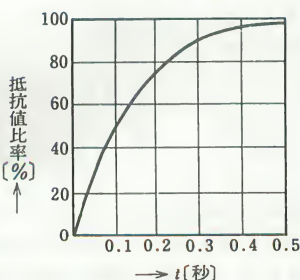
フーレ にぶいわけですね

「ソー  
じっくり考えて  
動いているのです」

32 図は CdS に光をあてたときの応答性を示したものです。

縦軸は、最終的に落ちつく抵抗値に対する比率をとっています。

この CdS では、光をあてたのち、この比率が50(%)に達するまでに何秒かかっているでしょうか。



0.1秒

そんなに 遅くもないですね

「マァーネ」

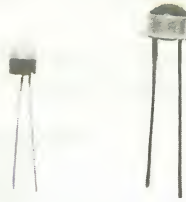
33 CdS は、他の光の検出器に比べて感度が(ア) \_\_\_\_\_ いという利点がありますが、応答が(イ) \_\_\_\_\_ く、応答速度を問題にするところでは使えません。

応答速度を問題にする場合には、次に学習するホトダイオードや、その原理を応用したホトトランジスタが用いられます。

(ア) 高  
(イ) 遅

## 34 ホトダイオード (Photodiode)

ホトダイオードは、CdSとともに光の検出器として非常によく用いられているもので、名前のとおりダイオードの一種です。



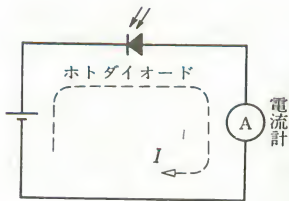
ダイオードというと  
一方向にしか電流を  
流さない素子だったかな

「そうですよ」

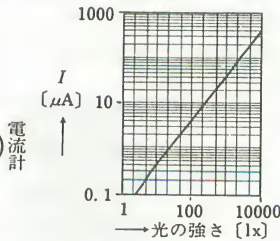
35 しかし、ホトダイオードは、図aのようにダイオードに通常加える電圧の方向とは逆に、電流の流れない方向、すなわち逆方向電圧を加えて使用します。

このように逆方向電圧を加えると、本来は電流が流れないわけですが、この状態でホトダイオードに光をあてると、その光の強さに応じた電流が流れるようになります。

図bは、MEL4760というホトダイオードの特性です。



(図a)



(図b)

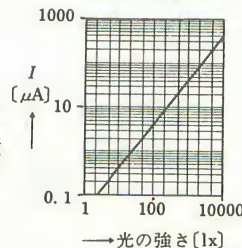
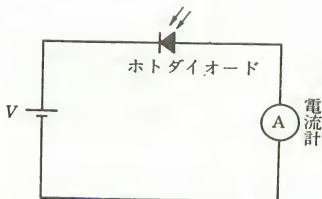
「逆方向の電圧を  
加えることに注意。」

わかりました

36 このとき流れる電流の値は、ダイオードに加える電圧Vの値にはほとんど影響されず、照射された光の強さに応じて変化します。

すなわち、ホトダイオードは数ボルトの逆方向電圧を加えておけば、電流の値はほとんど\_\_\_\_\_によって定まってしまいます。

このようなことから、ホトダイオードは光の強さを電流に変換する素子といえます。



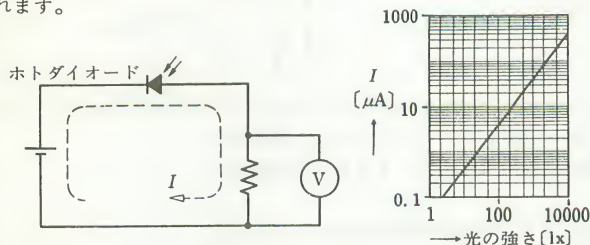
光の強さ

オマ オマ  
電圧には関係しないのか

「そうですよ  
(ほとんど) 影響しません」

37 また、ホトダイオードもCdSと同じように光の強さを電圧として取り出すこともできます。

すなわち、図のようにホトダイオードからの電流を抵抗に流すようにすれば、抵抗の両端から光の強さに応じた \_\_\_\_\_ が得られます。



電圧

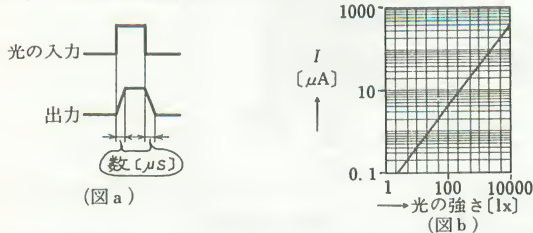
ハイ、ハイ

$V = IR$  でしょ

38 ところで、CdSは感度の点では申しぶんないのですが、応答速度が \_\_\_\_\_ という欠点がありました。

それに対して、このホトダイオードは図aのように、遅れ時間が数[μs]以下という非常に速い応答性をもっています。

ただ、その反面、光の強さに対する出力（電流の変化）は非常に小さく、したがって感度がよいとはいえません。



遅

「[μs]という単位は  
1/10<sup>6</sup>秒のことです」

「すべてに 万能とは  
なかなか  
むづかしいものですネ」

39 そこで、このホトダイオードの出力を図のようにトランジスタによって増幅し、その出力を取り出すようにしたものがあります。

一般には、このようなものがよく用いられています。

図aのように一つのトランジスタで増幅させたものをホトトランジスタ (Phototransistor) といい、図bのように二つのトランジスタで増幅させたものをダーリントン・ホトトランジスタといっています。



(図a) ホトトランジスタ

(図b) ダーリントン・ホトトランジスタ

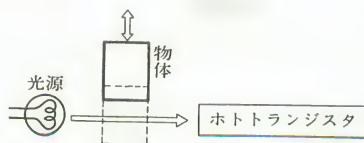
「この回路は 原理図ですよ。  
トランジスタについては  
第2章 で学習します」



40 ところで、CdSやホトダイオードなどは基本的には光の検出器なのですが、これをうまく応用することによって物体の有無や位置の検出にも利用できます。

たとえば、光源とホトトランジスタを図のように対向して置くと、その間を物体が通過するとき光源からの光がさえぎられるため、ホトトランジスタの出力が変化しますから、物体の有無や位置を検出することができるわけです。

リレーシーケンス制御などで使用する光電スイッチなどは、この原理を利用したものです。



なーるほじ  
使い方によって、用途も変え

「いふんない方き  
エ夫してくだいネ」

#### 41 位置の検出

ホトトランジスタなどの光の検出器によっても、物体の位置や変位の検出ができますが、この位置を検出するものの代表的なものにポテンシオメータや差動変圧器があります。



ポテンシオメータ



差動変圧器

位置専用の検出器ですネ

「そういうこと」

#### 42 ポテンシオメータ (Potentiometer)

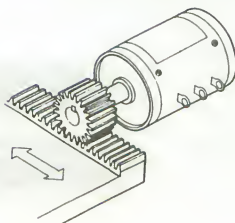
ラジオやテレビの音量や音質などを調整するために可変抵抗が用いられていますが、この可変抵抗は、実は位置の検出器として非常にべんりなものです。

可変抵抗は、つまみの回転角度に応じて\_\_\_\_\_が変化します。

抵抗値

そこで、図のように位置を検出しようとする物体と、可変抵抗の可動軸とを連結しておくとうでしようか。

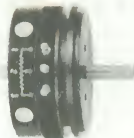
こうしておく、可変抵抗の抵抗値は物体の移動に応じて変化しますから、位置の検出ができるようになります。



ウーム  
ナルホド  
ナルホド

43 しかし、一般に用いられている可変抵抗をそのまま使っても、回転角と抵抗値の比例性や、抵抗値精度の点などで問題があります。

そこで、基本的には可変抵抗と同じですが、検出器として特に精密につくられたポテンシオメータというものが使われています。



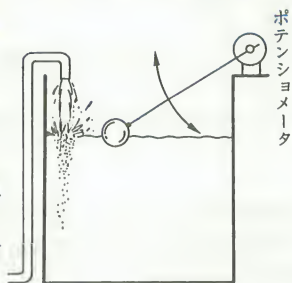
「形も 可変抵抗に  
よく似てますよ」

「ほんとだ、ほんとだ  
よく似ている」

44 図は、フロートとポテンシオメータを利用して水面の位置を検出しようとするものです。

このようにしておくと、水面の位置によってフロートが上下するため、ポテンシオメータの抵抗値が変化します。

これを応用すると、タンクなどの水位制御ができます。



フロートって 何ですか

「Float(浮子)のことですよ」

45 このポテンシオメータは、位置の検出器としては非常にべんりなものです。が、接触面（摺動面）があるため、耐久性や信頼性の点ではあまりよくありません。

また、その構造も機械的なもので、したがって同じ位置の検出でも、微小な位置変位を検出するには問題があります。

そこで、このような耐久性や微小な位置変位の検出が必要な場合には、次に学ぶ差動変圧器を用います。

でも 精度よく  
作ってあるんでしょ

「可変抵抗としてはネ」

#### 46 差動変圧器 (Differential transformer)

差動変圧器は、微小変位の検出器としてよく用いられるもので、一般には数ミクロンから数十ミリメートル程度の変位を検出する場合に利用されています。



「ミクロンって  
いくらだったかなあ」

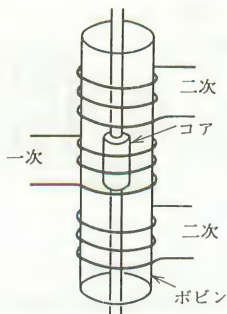
「 $\frac{1}{1000}$  ミリメートルですよ」

ウフエー、スゴいなあ



47 差動変圧器は、その名のとおり一種の変圧器で、図のような構成になっています。

一つのボビンに一次コイルと、二つのまったく同じ特性をもった二次コイルが上下対称に巻かれており、ボビンの中には自由に動くコアがはいています。



コアって なんですか？

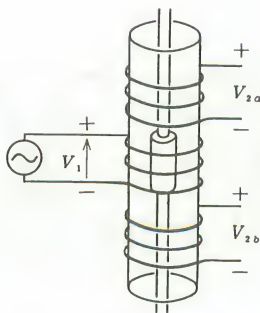
「磁性体で変圧器の一次側と二次側との電磁的な結合を強くするためのです」

48 さて、この変圧器の一次コイルに電圧を加えると、二次側のコイルにはどのような電圧が発生するのでしょうか。

変圧器の一次コイルに電圧をかけたとき、コアがちょうど中央にあれば、二次側の二つのコイルにはまったく同一の電圧が出てきます。

そして、コアが上方向や下方向に移動するとつぎのようになります。

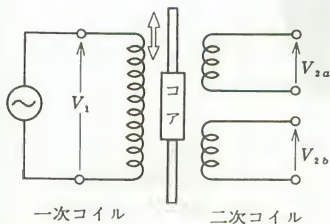
- (1) コアが上方向に移動すると  $V_{2a}$  が大きくなり、 $V_{2b}$  が小さくなる。
- (2) コアが下方向に移動すると  $V_{2b}$  が大きくなり、 $V_{2a}$  が小さくなる。



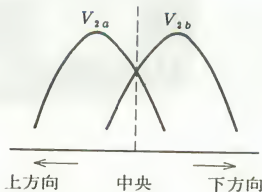
コアの位置によって電圧が違ってくぞ

「うまく考えたでしょ」

49 この状態を図 a のように、二次側コイルに電圧計をつないで測定してみると、図 b のような特性が得られます。



(図 a)

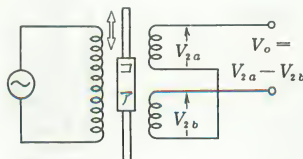


(図 b)

なほほど電圧を測定すると、コアの位置がわかりそうだなー  
「なかなか いいな」

50 では、二次側を図のように接続し、互いの出力電圧が打ち消しあうようにするとどうでしょう。

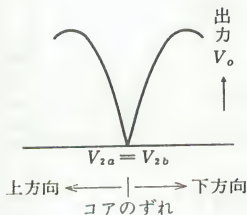
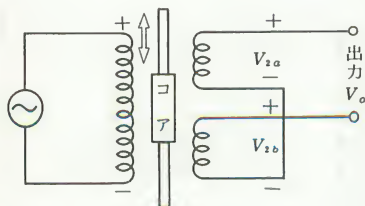
すなわち、出力電圧  $V_o$  として  $V_o = V_{2a} - V_{2b}$  の出力を出すようにするわけです。



ウーン  
どんな 電圧が出るのかな

51 このようにしておくと、コアが中央にある場合は  $V_{2a} = V_{2b}$  となって出力は  $V_{2a} - V_{2b} = 0$  となり、またコアの位置がどちらかに移動すると、その位置に応じた出力電圧が現れるようになります。

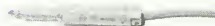
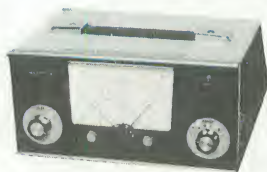
すなわち、コアの位置に応じた出力電圧が取り出せることになります。



ナルホドー  
位置検出したいところに、  
コアを連結しておけば  
いいわけだ。……………  
でも 差を取り出すのでは  
おもしろいなあー  
「だから 差動変圧器  
というんですよ」

52 このような差動変圧器を利用すると、微小な位置変位を検出することができます。

たとえば、機械測定分野で非常によく使われる電気マイクロメータなどには、この差動変圧器が用いられます。



「ご苦労さんでした。  
“学習の概要”で頭の中を  
整理しておいて下さいね」

# 練習問題

1 つぎの(1)～(6)の検出器は、それぞれ何を検出するためのものかを、(ア)～(ウ)の中から選びなさい。

- |              |           |
|--------------|-----------|
| (1) サーミスタ    | (ア) 温度の検出 |
| (2) ホトダイオード  |           |
| (3) ポテンシオメータ | (イ) 光の検出  |
| (4) CdS      |           |
| (5) 差動変圧器    | (ウ) 位置の検出 |
| (6) 熱電対      |           |

2 つぎの文章は、それぞれどのような検出器について説明したものか答えなさい。

- (1) 温度の検出に用いられ、小形で価格も安く、一般に 100 [℃] 程度以下のところでは非常によく利用されている。
- (2) 光の検出に用いられ、感度は非常によいが、応答速度はおそい。
- (3) 物体の位置の検出に用いられ、非常に高精度で、電気マイクロメータなどに応用されている。

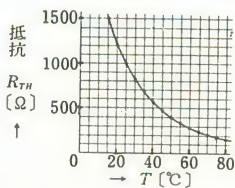
3 つぎの(1)～(6)の検出器は、検出した量を(ア)～(ウ)のどの電気量に変換するものか選びなさい。

- |              |        |
|--------------|--------|
| (1) サーミスタ    | (ア) 電圧 |
| (2) ホトダイオード  |        |
| (3) ポテンシオメータ | (イ) 電流 |
| (4) CdS      |        |
| (5) 差動変圧器    | (ウ) 抵抗 |
| (6) 熱電対      |        |

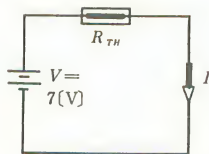
4 図 a のような特性をもつサーミスタを用いて、図 b や図 c のような回路をつくりました。

サーミスタの温度がつぎのようになったときのサーミスタの抵抗値と、図 b の回路の電流の値、図 c の回路の電圧の値をそれぞれ求めなさい。

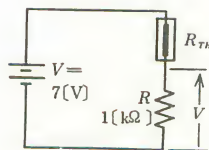
- (1) 25 [℃] のとき  $\Rightarrow R_{TH} = \underline{\hspace{2cm}} [\Omega]$ ,  $I = \underline{\hspace{2cm}} [A]$ ,  $V = \underline{\hspace{2cm}} [V]$
- (2) 50 [℃] のとき  $\Rightarrow R_{TH} = \underline{\hspace{2cm}} [\Omega]$ ,  $I = \underline{\hspace{2cm}} [A]$ ,  $V = \underline{\hspace{2cm}} [V]$



(図 a)



(図 b)



(図 c)



## 2. 電子制御の構成とトランジスタ

### 学習の目標

1. 制御とはどのようなものか、また制御内容の種類にはどのようなものがあるかを知り、電子制御の基本構成を学習する。
2. 電子制御を学習するうえで基礎となるトランジスタについて、つぎのことを学習する。
  - (1) トランジスタとはどのようなものか。
  - (2) トランジスタはどのような働きをするか。
  - (3) トランジスタはどのようにして活用すればよいか。



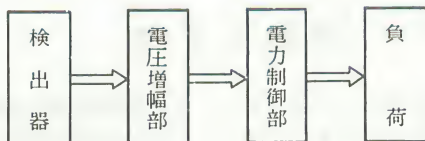


## 学習の概要

### 1. 電子制御の構成

- (1) 電子制御は図のように、検出器、電圧増幅部、電力制御部、および負荷によって構成されています。

- 電圧増幅部とは検出器からの信号電圧を増幅するための部分です。
- 電力制御部とは信号電圧に応じて負荷に加える電力を制御するための部分です。



- (2) 検出器からの信号電圧が大きい場合や、負荷の消費電力が小さい場合は、電圧増幅部や電力制御部が不要になる場合があります。

### 2. トランジスタと制御機能

#### (1) トランジスタの概要

- ① トランジスタは図 a のようにエミッタ、ベース、コレクタという 3 本の端子をもち、NPN トランジスタ、PNP トランジスタの 2 種類があります。

そして、それぞれ図 b のような図記号で表されます。

- ② 矢印のついてる端子がエミッタで、この矢印の方向はトランジスタに流す電流の方向を示しています。

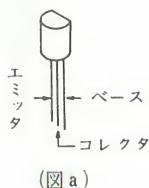
- ③ トランジスタには 2S□……という品番がついていますが、2S の次にくるアルファベットが A または B の場合は PNP トランジスタ、C または D の場合は NPN トランジスタを示しています。

〈例〉 2SA 564 → PNP トランジスタ

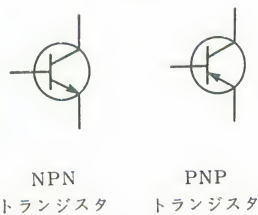
2SB 171 → ”

2SC 1684 → NPN トランジスタ

2SD 365 → ”



(図 a)



(図 b) 図記号

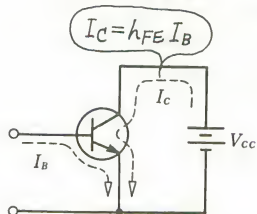
#### (2) トランジスタの基本動作と働き

##### ① トランジスタの電流制御機能

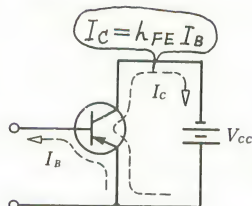
- トランジスタの種類によって、図 a や図 b のように電源  $V_{CC}$  を接続しておいてベース電流 ( $I_B$ ) を流すと、コレクタ電流 ( $I_C$ ) はベース電流 ( $I_B$ ) の  $h_{FE}$  倍に制御されます。

このようなトランジスタの働きを電流制御機能といい、この  $h_{FE}$  のことを電流増幅率といいます。

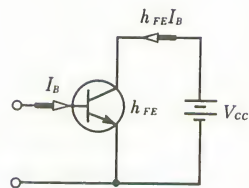
- エミッタ端子を流れる電流  $I_E$  は  $I_E = I_B + I_C$  となります。
- トランジスタを用いると、図 c のように小さな電流を大きな電流に増幅することができます。



(図 a) NPN トランジスタ



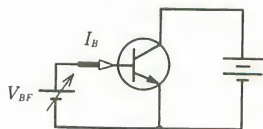
(図 b) PNP トランジスタ



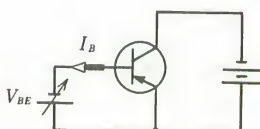
(図 c)

## ② トランジスタの電圧制御機能

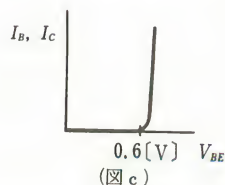
- トランジスタのベース・エミッタ間に図 a や図 b のように電圧  $V_{BE}$  を加えると、この電圧によってベース電流  $I_B$  は図 c のようになります。  
すなわち、 $V_{BE}$  が 0.6[V] 程度まではベース電流はほとんど流れませんが、0.6[V] を越えると急激に増加するようになります。
- ベース電流とコレクタ電流とは比例していますから、結局、コレクタ電流はベース・エミッタ間電圧  $V_{BE}$  によって制御されると考えることもできます。  
このような見方をしたトランジスタの働きを、コレクタ電流 ( $I_C$ ) がベース・エミッタ間電圧 ( $V_{BE}$ ) によって制御されるということから電圧制御機能といっています。



(図 a)

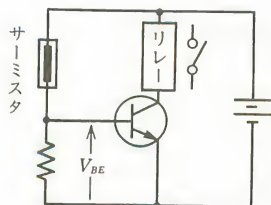


(図 b)

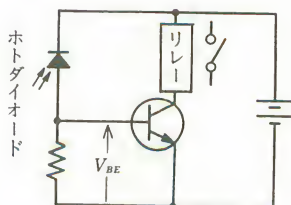


(図 c)

- トランジスタを用いると、図のように検出器からのわずかな電圧変化でリレーを制御したりすることができるようになります。



温度上昇  $\rightarrow V_{BE}$  増加  $\rightarrow I_B$  増加  
リレー ON  $\leftarrow I_C$  増加



光が強くなる  $\rightarrow V_{BE}$  増加  $\rightarrow I_B$  増加  
リレー ON  $\leftarrow I_C$  増加

## 学習の展開

1 第1章では、温度や光の強さなどを電氣量に変換する検出器について学習してきました。

いよいよ、この章からは、これらの検出器出力を用いて負荷を制御する方法について学習していきましょう。

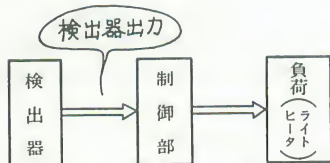
○電氣コタツの温度をコントロールするためには、温度に応じてヒータに流れる電流を制御する必要があります。

○また、対向車線に車がきたときに自分のライトを減光するためには、対向車のライトを検出して自分の車のライトを制御する必要があります。

さあ スタートだ！

2 つまり、制御を行うためには、コタツの温度や対向車のライトを検出してきた信号で、コタツのヒータや自分の車のライトを操作する必要があるわけです。

ここで、検出器出力を用いて負荷に所要の操作を加えるための部分を制御部といっています。



制御とは「ある目的を達成するために対象となるものに所要の操作を加えること」と定義されています。

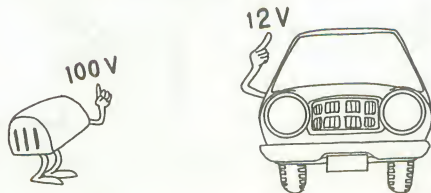
いよいよ  
制御部の学習だね

「そうですね  
まず 概要からだ」

3 ところで、ひとくちに制御といっても、その内容は負荷の種類や制御の方法によっていろいろなものがあります。

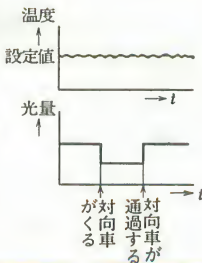
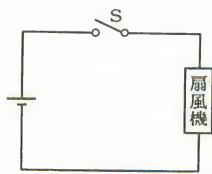
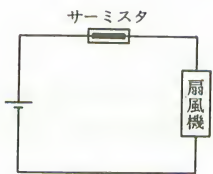
たとえば、電氣コタツのヒータは交流の100[V]で動作するものですし、車のヘッドライトは一般に直流12[V]の電源で動作させています。

また、一般に電氣コタツのヒータは数百ワットの消費電力ですが、車のヘッドライトは数十ワットの消費電力です。



ウーン  
なかなか  
むづかしいですねー

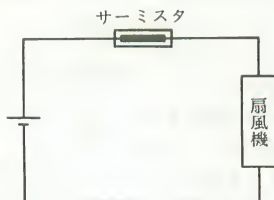
「ただし  
基本は同じなんですヨ」

<p>4 また、電気コタツの場合は、設定された温度からすこしでも温度が下がると上昇するように働き、また、すこしでも温度が上昇すると温度低下する方向に働くというように、常に設定された値に保つ動作をさせたほうがいいのですが、車のライトの場合は、対向車線に車がきたことを検出して減光動作に切り換える動作をさせるわけです。</p>	 <p>フン、フン こういう見方をすると 制御の種類も いろいろだなア 「目処に応じて うまーく 制御してくださいヨ」 ハア イ!</p>
<p>5 このように、ひとくちに制御といっても、負荷の種類が直流か交流か、またその消費電力がどの程度か、あるいは制御動作はどのようなものか、などによって回路の構成や使用する素子が異なってきます。</p> <p>この章以降では、これらのいろいろな制御内容について、基礎的なものから段階的に学習を進めていきたいと思います。</p>	<p>ヨロシク お願いします</p>
<p>6 まず、この章では、制御部の基本的な構成と、これからの学習の基礎となるトランジスタの働きについて学んでいきたいと思います。</p> <p>それでは最初に、制御部の基本構成から学習していきましょう。</p>	
<p>7 まず、制御部としてどのような働きをするものがいいのかということについて、わかりやすいように直流で回る扇風機を仮定し、温度によって回転速度を制御する場合を例に考えてみましょう。</p> <p>図 a は、スイッチ S を手動によって操作し、扇風機を回すという基本の回路です。</p> <p>この回路では、温度が上昇して暑くなっても、スイッチ S を ON にしないと扇風機は回りません。</p> <p>そこで、図 b のようにスイッチの代わりに温度の変化を検知する _____ を用いて、回路をつくってみました。</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-end;"> <div data-bbox="168 1215 380 1387">  <p>(図 a)</p> </div> <div data-bbox="470 1215 683 1387">  <p>(図 b)</p> </div> </div>	<p>サーミスタ</p> <p>自動的に扇風機の回転速度を制御しようってわけですね 「そつつもりです」</p>



8 このようにサーミスタを接続すると、どうなるでしょうか。

サーミスタは、温度が低いときは抵抗値が大きくなり、逆に温度が上昇すると抵抗値が減少するので、扇風機に流れる電流は、温度に応じて変化します。



(ア) 大き (高)

(イ) 小さ (低)

○温度が低い ⇒ 抵抗値が(ア) い ⇒ 電流があまり流れない。

○温度が高い ⇒ 抵抗値が(イ) い ⇒ 大きい電流が流れる。

すると 温度によって  
自動的に扇風機の回転速度  
が変化するぞ！

「次のフレームへどうぞ」

9 しかし、このままの回路では扇風機はとても回ってくれません。  
なぜだと思いますか。

実は、これには二つの問題があります。

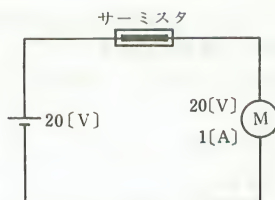
へー  
なぜかな？

10 まず一つは、サーミスタの抵抗値の変化の問題です。

たとえば、図のように扇風機には20[V], 1[A]のモータが取り付けられていたとしましょう。

この場合、このモータの回転速度をコントロールするためには、モータに流れる電流を、温度によって0[A]付近から1[A]近くまで制御できるようにしなくてはなりません。

すなわち、サーミスタの抵抗は、ほぼ0[Ω]付近から、モータに流れる電流を0にするようなかなり大きな抵抗値まで、温度によって変化しなければならないことになります。



$I = \frac{V}{R}$  だから 0 から  
無限大近くまでと  
いうことか  
これは ちょっと  
ヤっかいだぞ

11 サーミスタの抵抗変化は、いろいろな温度検出器の中でもかなり感度のいいほうですが、それでも室内の温度変化程度では、それほど大きな変化はしません。

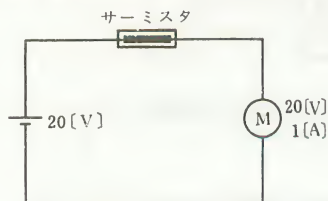
フン、フン  
ヤッぱりネエー



12 もう一つの問題は、サーミスタに1[A]もの電流を流すことができないということです。

サーミスタは抵抗ですから、電流を流せば電力損失 ( $I^2R$ ) を生じます。

そして、その電力損失はすべて熱の発生となるわけです。



「 $I^2R$ によって発生する熱のことをジュール熱といっています」

13 サーミスタ内部でこのような熱が発生すると、この熱によってサーミスタ自身の抵抗値が変化を受けてしまいます。

つまり、温度を検出すべきサーミスタが、自分自身から発生した熱に影響されて抵抗値を変化させてしまうことになるわけで、これらはすべて誤差となってしまいます。

ナルホド

14 このようなことは、サーミスタだけでなく、他の検出器についてもいえるのですが、検出器をできるだけ少ない誤差で動作させるためには、できるだけ\_\_\_\_\_い電流で動作させる必要があら

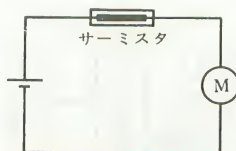
小さ (少な)

15 もう一度整理すると、図のような回路を構成して、温度によってモータの回転速度をコントロールしようとしても、つぎの二つのことが原因でうまく動作させることができないのです。

(1) サーミスタの抵抗値変化が

(ア) \_\_\_\_\_い。

(2) サーミスタに大きな電流を流すことが(イ)\_\_\_\_\_。

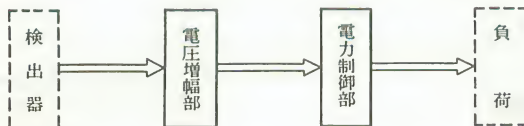


(ア) 少な

(イ) できない

16 それでは検出器を用いて負荷を制御しようとする場合、どのようにすればよいのでしょうか。

17 検出器を用いて負荷を制御する場合は、以上のことから、図のように検出器と負荷との間に電圧増幅部や電力制御部と呼ばれている回路が必要となってくるのです。

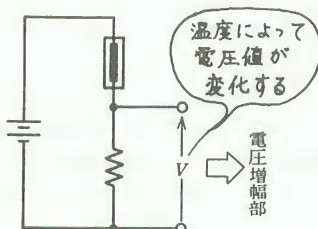


電圧増幅部とは、小さな信号電圧を大きな信号電圧に増幅するためのものです。

また、電力制御部とは、負荷に加える電力を制御するためのものです。

そして、検出器からの出力は電圧値で取り出すようにしておきます。

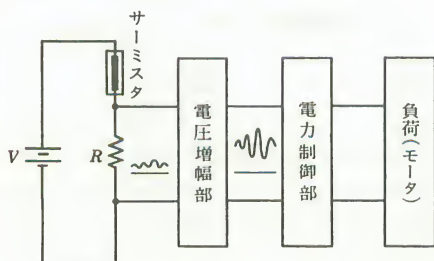
つまり、検出器を図のように接続し、その出力を電圧増幅部に加えるわけです。



フーン  
電圧増幅や電力制御と  
行なうわけか……

「回路は あとの  
おたのしみに……」

18 このようにすれば検出された信号電圧がたとえ小さくても、電圧増幅部で大きな信号電圧に増幅し、さらに後段の電力制御部で負荷を制御できるようになります。

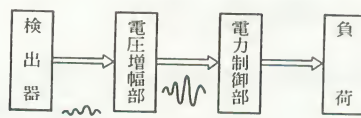


検出器がサーミスタでない  
ときも、検出出力は電圧値  
として取り出すわけですね

「そういうこと」

19 すなわち、検出器を用いて負荷を制御しようとする場合には、図のように検出器の出力を電圧出力とし、そしてその電圧出力を電圧増幅部で大きな電圧に増幅し、さらにその出力を電力制御部に加えて、モータなどの大電力負荷を制御するということになります。

つまり、検出器を用いて負荷を制御する場合、一般には図のような構成になっています。



「これが電子制御の基本構成ですよ」

ハーイ 覚えておきます

20 ただし、電子制御の基本構成がいつもこのような形ばかりだとは限りません。

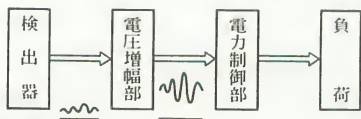
検出器によっては大きな検出出力電圧が得られる場合もあります。

このような場合は、もちろん (ア) \_\_\_\_\_ 部は不要です。

また負荷についても、モータのように大きな電力を必要とするものではなく、たとえば表示だけをさせる場合などは、メータのような小電力で働くものが負荷となりますから、このようなときには

(イ) \_\_\_\_\_ 部はいりません。

したがって、実際には、必要に応じて電圧増幅部や電力制御部をつければいいことになります。



(ア) 電圧増幅

(イ) 電力制御

21 では、このような電圧増幅部や電力制御部は、どのようにしてつくればよいのでしょうか。

まず、電圧増幅をさせるための半導体素子としては、トランジスタやオペアンプがあります。

また、電力制御をするための半導体素子としては、同じくトランジスタや、すこし動作は異なりますが、サイリスタなどがあります。




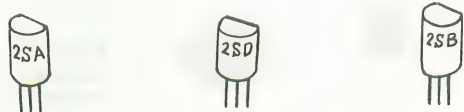
トランジスタ オペアンプ  
(図 a) 電圧増幅用素子

トランジスタ サイリスタ  
(図 b) 電力制御用素子

トランジスタは どちらにも  
いけるんですね。

「そうですよ。

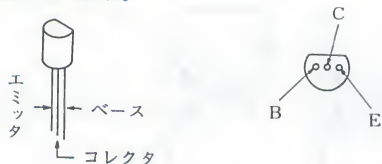
トランジスタは 半導体素子の基本であり、電子制御を構成する上で、一番重要な素子なんです」

<p>22 これから学習が進むにつれて、サイリスタやオペアンプについても取り扱っていきますが、まず第一段階として、トランジスタを用いたものについて学習していきたいと思います。</p>					
<p>23 <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">トランジスタ (Transistor)</span></p> <p>それではトランジスタの種類と表示、および電極間構造の概要から学習を始めることにしましょう。</p> <p>トランジスタにはつぎのようにいろいろな形状のものがあります。</p> <div style="text-align: center;">  </div>	<p>いよいよ トランジスタの学習だね 頑張りで、</p> <p>「その意気 その意気。」</p>				
<p>24 そして、トランジスタには、基本的にNPN形とPNP形という二つの種類のものがあります。</p> <p>一般のトランジスタには、2S□……というような品番がついていますが、Sの次のアルファベットがAまたはBのものはPNPトランジスタで、CまたはDのものはNPNトランジスタであることを意味しています。</p> <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="text-align: center;">2SA……PNPトランジスタ</td> <td style="text-align: center;">2SC……NPNトランジスタ</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">2SB……                    〃</td> <td style="text-align: center;">2SD……                    〃</td> </tr> </table>	2SA……PNPトランジスタ	2SC……NPNトランジスタ	2SB……                    〃	2SD……                    〃	<p>「このような記号のつけ方は、電子機械工業会で定められています。」</p>
2SA……PNPトランジスタ	2SC……NPNトランジスタ				
2SB……                    〃	2SD……                    〃				
<p>25 これらはいずれも、外形や基本動作はまったく同じものですが、内部構造がちがっており、使用法もすこし異なっていますから、表示を見ればどちらのタイプのトランジスタか区別がつくようにしてください。</p> <p>つぎのトランジスタは何形でしょうか。</p> <div style="text-align: center;">  </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-top: 10px;"> <div style="text-align: center;"> <p>(ア) _____ 形</p> <p>トランジスタ</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>(イ) _____ 形</p> <p>トランジスタ</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>(ウ) _____ 形</p> <p>トランジスタ</p> </div> </div>	<p>「しっかり覚えておいて下さいヨ」</p> <p>ハーイ わかりました</p> <p>(ア) PNP (イ) NPN (ウ) PNP</p>				



26 そして、いずれの形のトランジスタにも3本の端子があり、それぞれの端子をベース、エミッタ、コレクタといっています。

このベース、エミッタ、コレクタはそれぞれB、E、Cという記号で表示され、どの端子がなんという端子なのかということは、カタログに示されています。



見ただけでは  
わからないわけですね

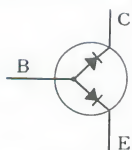
「まあね、  
色んな「表すの仕方」が  
あるから……」

27 では次に、トランジスタの3本の電極の中身がどのようなになっているのかをみていきましょう。

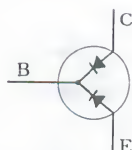
トランジスタにはNPN形トランジスタとPNP形トランジスタという2種類のものがありましたが、これらの内部は基本的にはダイオードが図のように接続されたような形になっています。

NPNトランジスタの場合は、ベースからエミッタ、ベースからコレクタの方向に、それぞれダイオードがはいつたようになっています。

また、PNPトランジスタの場合は、エミッタから(ア)\_\_\_\_\_, コレクタから(イ)\_\_\_\_\_, の方向に、それぞれダイオードがはいつたようになっています。



NPNトランジスタ



PNPトランジスタ

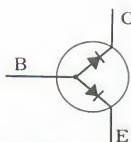
(ア) ベース

(イ) ベース

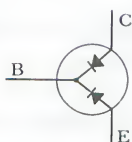
ホー  
それなら「ダイオード2つで」  
トランジスタか? できるかな?

「あわてない  
あわてない」

28 トランジスタにはNPNトランジスタとPNPトランジスタという二つの種類があり、これらは図のようにベースを中心にして二つのダイオードが互いに逆方向に接続されたような内部構成をしています。



NPNトランジスタ



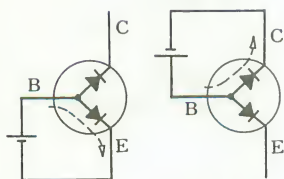
PNPトランジスタ

「ベースから「外向き」がNPN.  
ベースを「向いている」のが  
PNP形です」

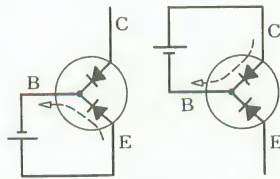
よし 覚えておこう



29 したがって、ベース・コレクタ間やベース・エミッタ間に図のように電圧をかけると、それぞれのダイオードに順方向電圧が加わることになって、電流が流れます。



NPNトランジスタの場合



PNPトランジスタの場合

本家に このように  
なるんですね

「もううん」

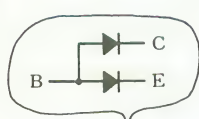
30 この性質を利用すれば、トランジスタの良否をチェックする場合、テスタを用いてこのような方向に電流が流れるかどうかをしらべることによって、およその判定ができます。



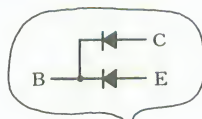
フン フン  
ダイオードが 正常かどうか  
を見れば いいわけだ。

「わかりが早いね。  
その調子、その調子」

31 また、トランジスタのベース・エミッタ間やベース・コレクタ間を、つぎのようにダイオードの代用として用いることもできます。



NPNトランジスタ



PNPトランジスタ

ナルホド

「電極標を しっかり  
覚えておいて下さいよ」

32 以上で、トランジスタの種類や、それらの外形、あるいは電極間の関係については理解できましたね。

これらのことは、トランジスタを実際に使っていく際に意外に役に立つことですから、覚えておいてください。

それではトランジスタ本来の働きについて学習していくことにしましょう。

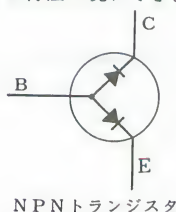
「いよいよ  
ですゾー」

## 33 トランジスタの働き (1)

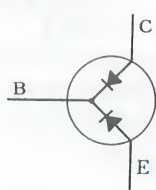
トランジスタの内部はそれぞれ図のようになっていることを知りました。

しかし、トランジスタはこのような単純な素子ではありません。いままでの話は、トランジスタの3本の電極のうち、ベースとエミッタ、あるいはベースとコレクタという、それぞれ2本の電極間の関係だけを単独に考えたので、このような見方になったわけです。

トランジスタの3本の電極に同時に電圧をかけてみると、もっとちがった特性が現れてきます。



NPNトランジスタ



PNPトランジスタ

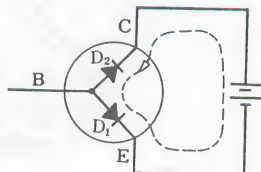
ホー  
じんの特性が  
どうかな  
「次のフレームへ  
どうぞ」

## 34 わかりやすくするために、ここではNPNトランジスタを中心に考えることにしましょう。

NPNトランジスタのコレクタ・エミッタ間に、図のように電圧を加えてみます。

図の場合は、 $D_1$ については順方向電圧ですが、 $D_2$ に対しては逆方向となるため、破線のような方向の電流は\_\_\_\_\_。

では、この状態で、さらにベース・エミッタ間にも電圧を加えてみましょう。

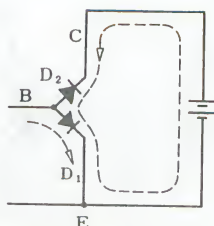


流れません  
何の意味もありません  
「マァーネ」

35 図の場合は、 $D_2$ のダイオードが逆方向になっているため、このままではコレクタ・エミッタ間に電流は流れませんね。

ところが、この状態でベース・エミッタ間に電流を流すことによって、実はこのダイオード $D_2$ に電流が流れるようになるのです。

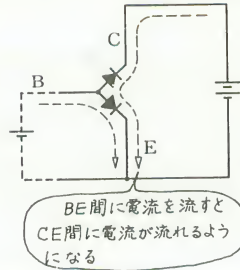
この現象が、単にダイオードを二つ接続しただけではない、トランジスタ独特の動作なのです。



オヤ オヤ  
 $D_2$ をつき抜けて  
電流が流れるわけですか  
「そうなんです」

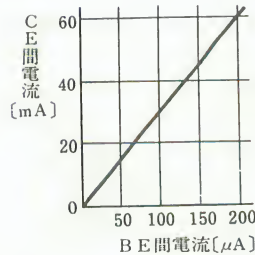
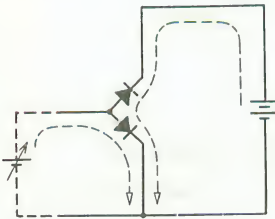
36 すなわち、図のようにコレクタ・エミッタ間に電圧を加えておき、さらにベース・エミッタ間に電圧を加えてベース・エミッタ間に電流を流すと、コレクタ・エミッタ間に図のような電流が流れるようになります。

そして、ベース・エミッタ間に流れる電流を増加すると、コレクタ・エミッタ間に流れる電流も増加します。



37 つぎのグラフは 2SC1684 と呼ばれる NPN トランジスタについて、ベース・エミッタ間の電流に対してコレクタ・エミッタ間の電流がどのようになるかを示したものです。

グラフからわかるように、ベース・エミッタ間の電流が 0 のときはコレクタ・エミッタ間の電流も (ア) \_\_\_\_\_ となり、またベース・エミッタ間の電流を増加させると、コレクタ・エミッタ間の電流も (イ) \_\_\_\_\_ しています。



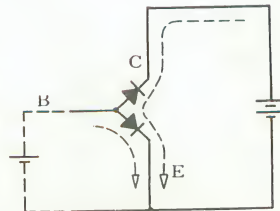
(ア) 0

(イ) 増加

フンフン  
ナルホドー

38 つまり、トランジスタはコレクタ・エミッタ間に電圧を加えておき、ベース・エミッタ間に電流を流すと、この電流によって、(ア) \_\_\_\_\_ ・エミッタ間に電流が流れるようになるわけです。

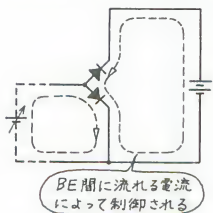
そして、ベース・エミッタ間に流れる電流を増加させると、このコレクタ・エミッタ間に流れる電流も (イ) \_\_\_\_\_ するというわけです。



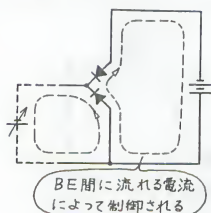
(ア) コレクタ

(イ) 増加

39 このことはNPNトランジスタだけにいえることではなく、PNPトランジスタであっても同じような動作をします。



NPNトランジスタ



PNPトランジスタ

アレアレ  
PNPの場合は  
電流の方向が違うぞ！

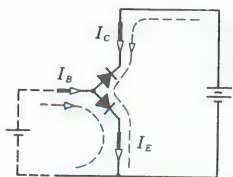
「電流の方向については、  
あとで学習します」

40 ここで、トランジスタのベース・エミッタ間に流れる電流のことを、ベース端子を流れる電流ということでベース電流 ( $I_B$ ) といい、コレクタ・エミッタ間に流れる電流のことを、コレクタ端子を流れる電流ということでコレクタ電流 ( $I_C$ ) としています。

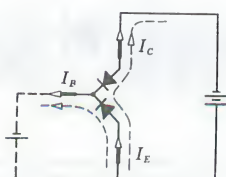
そして、この  $I_B$  と  $I_C$  はともにエミッタ端子にも流れるようになりますが、この電流をエミッタ電流 ( $I_E$ ) としています。

NPN, PNPのいずれのトランジスタの場合でも、これらの  $I_B$ ,  $I_C$ ,  $I_E$  の間にはつぎの関係があります。

$$I_E = I_B + I_C$$



NPNトランジスタ

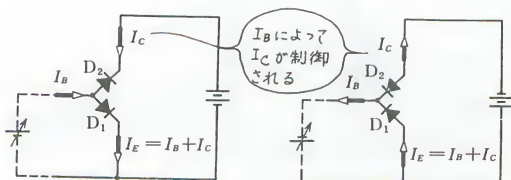


PNPトランジスタ

エミッタ端子を  
共通にして、 $I_B$ ,  $I_C$  が  
流れるわけですね

41 つまり、トランジスタにはベース電流 (ベース・エミッタ間に流れる電流)  $I_B$  によってコレクタ電流 (コレクタ・エミッタ間に流れる電流)  $I_C$  を制御する働きがあるわけです。

このようなトランジスタの働きを電流制御機能としています。



NPNトランジスタ

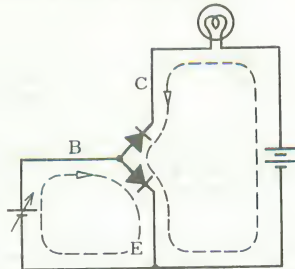
PNPトランジスタ

「トランジスタ動作の  
基本ですか  
しっかり覚えて下さいヨ」

ハイイ。



42 ではトランジスタのコレクタ・エミッタ間に図のようにランプと電源の回路を接続しておき、ベース電流をつぎのように変化させると、ランプはどのようなになるでしょうか。



ベース電流=0のとき⇒ランプに電流が流れず、点灯しない。  
 ベース電流を増加する⇒ランプに流れる電流が増加し、明るくなる。  
 ベース電流を減少する⇒ランプに流れる電流が減少し、暗くなる。

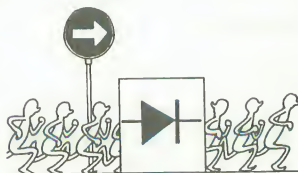
フン フン  
 ナレホド  
 ナレホド

43 さて、トランジスタにはこのような電流制御の働きがあることがわかりました。

ところで、トランジスタにこのような動作をさせるためには、一つの条件があります。

それはトランジスタに流す電流の方向です。

トランジスタは、どの方向に電流を流しても同じ働きをするわけではありません。

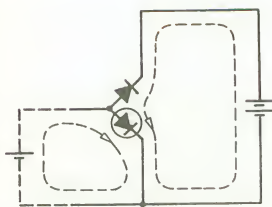


トランジスタには  
 方向性があるって  
 ことだな

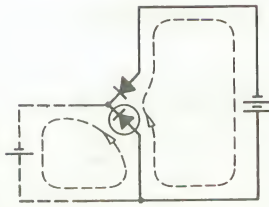
「一方通行に注意！」

44 トランジスタには、ベース・エミッタ間のダイオードの矢印にそって電流が流れるような方向に電圧を加える必要があります。

そこで、NPNトランジスタであれば図aのように、またPNPトランジスタであれば図bのように、それぞれ電圧を加えます。



(図a) NPNトランジスタの場合



(図b) PNPトランジスタの場合

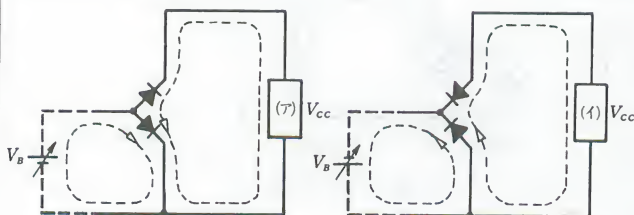
フーン  
 するとB-E間ダイオード  
 の方向が、道路標識って  
 わけかい

「そち へう こと」



45 トランジスタをうまく働かせるためには、ベース電流  $I_B$  がそれぞれ図のように流れるような電圧  $V_B$  を加え、またコレクタ電流が図のように流れるように電圧  $V_{CC}$  を加えなければなりません。

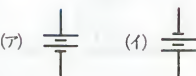
トランジスタは非常にべんりなものです、この約束だけは確実に守らないと動作しません。



(図 a) NPN トランジスタの場合 (図 b) PNP トランジスタの場合

「約束やぶっちゃ  
グメですよ」

ハイ



46 ところで、この約束については、トランジスタの図記号にも簡潔に表示されています。

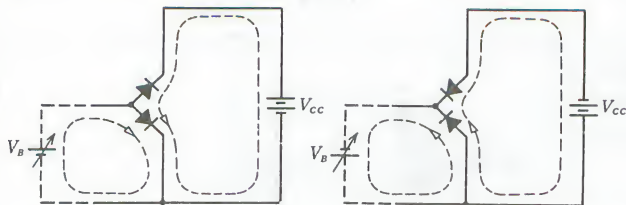
図 a は NPN トランジスタの図記号を、図 b は PNP トランジスタの図記号を示しています。

NPN 形と PNP 形のそれぞれの図記号を見てわかるように、ベース・エミッタ間のダイオードの方向だけを矢印で表示してあります。



(図 a) NPN トランジスタ (図 b) PNP トランジスタ

ですから、トランジスタを使うときには、この矢印に合うようにベース電流を流し、この矢印に合ったコレクタ電流が流れるような電圧をコレクタ・エミッタ間に加えればいいのです。



(図 c) NPN トランジスタの場合 (図 d) PNP トランジスタの場合

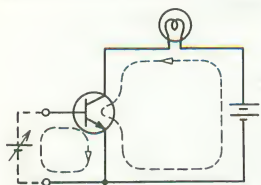
ナールホド  
これはわかりやすいや

「図記号って づまく  
考えてあるでしよ」

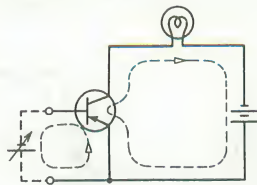
47 トランジスタの図記号と、その意味がわかりましたね。

エミッタの矢印は、電流の方向を表示しているわけです。

したがって、ランプの電流を制御する場合にも、トランジスタの種類によってつぎのように接続しなければなりません。



NPNトランジスタの場合



PNPトランジスタの場合

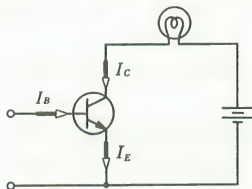
NPNトランジスタとPNPトランジスタとの違いはこの点だけで、他の動作はまったく同じです。

フレ フレ

OK, OK.

48 それではもとにもどって、トランジスタの電流制御機能について、引き続き学習を進めていきましょう。

これまでの学習で、トランジスタのベース電流 ( $I_B$ ) によって、コレクタ電流 ( $I_C$ ) を制御できるということがわかりました。

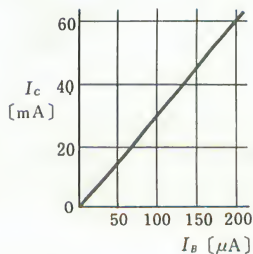


これはもう  
バッチリ

49 ところで、さきほどの 2SC1684 の特性表をもう一度見なおしてみてください。

ベース電流  $I_B$  の変化に対して、コレクタ電流  $I_C$  の値はどのようなになっているでしょうか。

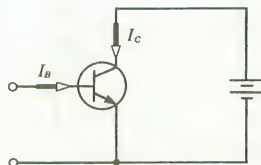
$I_B$  が  $0 [\mu A]$  から  $50 [\mu A]$  まで変化すると、 $I_C$  は (ア) \_\_\_\_\_ [mA] から (イ) \_\_\_\_\_ [mA] まで変化しています。



(ア) 0

(イ) 15

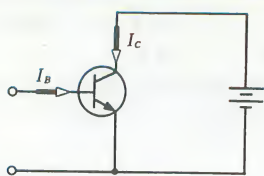
50 ベース電流  $I_B$  の  $0 \sim 50 [\mu A]$  という非常に小さな値の変化に対して、コレクタ電流  $I_C$  はかなり大きく変化していますね。



フレ フレ

およそ 300 倍に  
なってますね。

51 このことからわかるように、トランジスタはベース電流  $I_B$  によってコレクタ電流  $I_C$  の流れを制御するだけでなく、非常に小さい  $I_B$  の値で  $I_C$  の値を大きく変化させることができます。



ここで、ベース電流  $I_B$  の値に対して、何倍のコレクタ電流  $I_C$  が流れるかという比率を電流増幅率  $h_{FE}$  としています。

この値はカタログに必ず明記されていますが、一般に数十から数百の値をもっています。

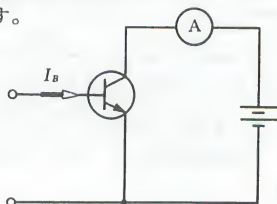
すなわち、トランジスタはベース電流  $I_B$  の非常に小さな変化に対して、コレクタ電流の値を数十倍から数百倍に増幅させることができるわけです。

ナールホド  
すると 電流制御機能は  
電流増幅機能も  
いえるわけだ。

「見方を変えればネ」

52 したがって、単に電流を増幅しようとする場合であれば、トランジスタを用いて図のような回路を構成することによって簡単に小さな電流を大きな電流に増幅できます。

たとえば、図の回路でトランジスタの  $h_{FE}$  が 100 のとき、 $I_B$  を 0 から  $20[\mu A]$  まで変化させると、電流計の指示はどのようになりますか。



$I_B = 0$  のとき  $\Rightarrow$  (ア) \_\_\_\_\_ [mA]  
 $I_B = 20[\mu A]$  のとき  $\Rightarrow$  (イ) \_\_\_\_\_ [mA]

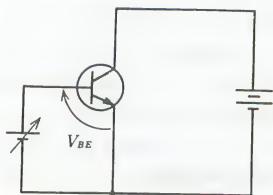
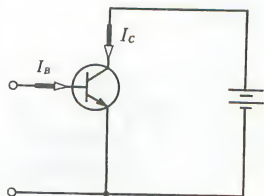
ア フン フン  
電流増幅率倍に  
なるわけだな

(ア) 0

(イ) 2

### 53 トランジスタの働き (2)

これまではトランジスタにベース電流  $I_B$  を流したときのコレクタ電流  $I_C$  の動作について考えてきましたが、次にベース・エミッタ間の電圧  $V_{BE}$  が変化した場合を考えてみましょう。



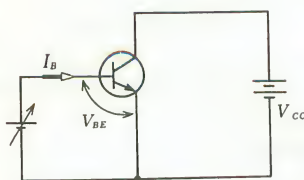
「今までは、 $I_B$  に対する  
 $I_C$  の変化 をみてきました。  
これからは、 $V_{BE}$  に対する  
 $I_C$  の変化をみていく  
というわけですよ」

54 すでに学んだように、トランジスタはコレクタ電流をベース電流の  $h_{FE}$  倍に増幅する働きをもっています。

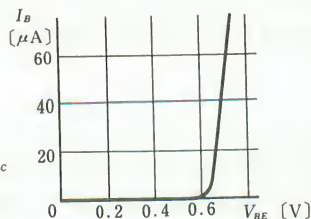
ところで、このベース電流を流すために必要なベース・エミッタ間の電圧は、すこし変わった特性をもっています。

図bは、図aの回路でベース・エミッタ間に加える電圧  $V_{BE}$  を 0 [V] からしだいに上昇させていったときのベース電流  $I_B$  の特性を示しています。

これを見ると、 $V_{BE}$  が 0.6 [V] 程度まではベース電流  $I_B$  はほとんど流れませんが、この値をすこし越えると急激に電流が流れ始めています。



(図 a)



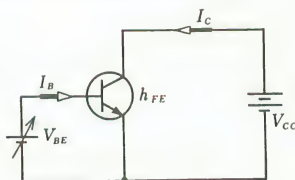
(図 b)

ナルホド  
変な特性だなあ

「でも 0.6 [V] かり  
立ち上っていうと  
覚えると簡単ですよ」

55 トランジスタのベース・エミッタ間に電圧  $V_{BE}$  を加え、その電圧を徐々に上昇させていくと、0.6 [V] 程度まではほとんどベース電流  $I_B$  は流れませんが、その値を越えると、 $V_{BE}$  のわずかの上昇で  $I_B$  の値が急上昇します。

一方、ベース電流が流れると、その \_\_\_\_\_ 倍の電流がコレクタ電流として流れますから、 $I_B$  が急上昇すれば、それにとまって  $I_C$  も急上昇するようになります (コレクタ・エミッタ間には、電圧を加えておく必要があります)。



$h_{FE}$

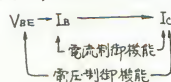
ナルホド  
 $V_{BE}$  によって  $I_B$  が増加し  
 $I_B$  によって、 $I_C$  が増加  
するわけだ。  
「そのとおり」

56 とところで、さきほどはトランジスタの働き(1)として、コレクタ電流  $I_C$  がベース電流  $I_B$  によって制御されると考えていました。

しかし、 $V_{BE}$  と  $I_C$  との関係でトランジスタの働きをとらえると、 $V_{BE}$  によって  $I_C$  が制御されると考えることもできます。

このような見方をしたトランジスタの働きを、 $V_{BE}$  によって  $I_C$  が制御されるということから電圧制御機能といっています。

こういうことかな





57 つぎのグラフは 2SC1684 の  $V_{BE}$ - $I_B$  特性です。

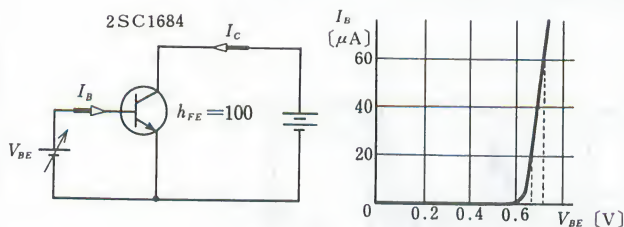
図のような回路で  $V_{BE}$  の値をつぎのようにしたとき、コレクタ電流  $I_C$  がいくらになるか求めてください。

$$V_{BE} = 0.67[\text{V}] \Rightarrow I_C = (\text{ア}) \quad [\text{mA}]$$

(ア) 2

$$V_{BE} = 0.72[\text{V}] \Rightarrow I_C = (\text{イ}) \quad [\text{mA}]$$

(イ) 6



この例題をみても、ベース・エミッタ間の電圧  $V_{BE}$  の変化によってコレクタ電流  $I_C$  が急激に変化することがわかりますね。

「電圧制御機能は、しっかりと把握して下さいヨ」

ハーイ  
わかりました

58 それでは、図のようにサーミスタを接続し、温度によって図の電圧  $V_{BE}$  が変化するようにしておくとうどうでしょうか。

温度が低い状態では、 $V_{BE}$  の値が  $0.6[\text{V}]$  以下となって  $I_B$  を流さないように抵抗  $R_B$  や電源電圧の値を設定しておきます (一般に電源としては、図 a のように  $V_{BB}$  と  $V_{CC}$  の二つを用いるようなことはしないで、図 b のように一つの電源で共用するようにしています)

温度が上昇する  $\Rightarrow$  サーミスタの抵抗値が(ア)する。

(ア) 減少

$\Downarrow$

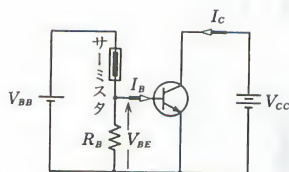
$V_{BE}$  が(イ)くなる。

(イ) 大き

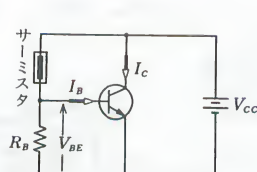
$\Downarrow$

$I_B$ ,  $I_C$  が(ウ)する。

(ウ) 増加



(図 a)



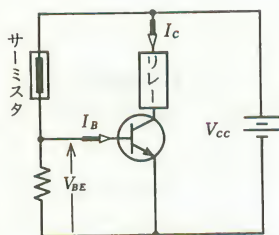
(図 b)

ナルホド  
ナルホド

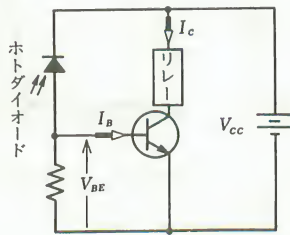


59  $V_{BE}$  のわずかな変化によって、コレクタ電流  $I_C$  の値がかなり大きな変化をすることがわかりましたね。

この性質を利用して、たとえば温度や光などによってリレーを駆動し、その接点によってモータなどを動作させる場合には、図 a や図 b のようにサーミスタやフォトダイオードを接続し、コレクタ回路にリレーを接続しておけば、温度や光の変化に応じてリレーを働かせることができます。



(図 a)



(図 b)

図 a の場合

温度が上昇する  $\Rightarrow V_{BE}$  が(ア) \_\_\_\_\_ する  $\Rightarrow I_B$  が(イ) \_\_\_\_\_ する  
 $\Downarrow$   
 リレーが働く  $\Leftrightarrow I_C$  が(ウ) \_\_\_\_\_ する

図 b の場合

光が強くなる  $\Rightarrow V_{BE}$  が上昇する  $\Rightarrow I_B$  が増加する  
 $\Downarrow$   
 リレーが働く  $\Leftrightarrow I_C$  が増加する

(ア) 上昇 (イ) 増加

(ウ) 増加

フン フン

図 a は ある程度以上になると、  
 リレー接点を ON に  
 しようというわけだす

「そうですヨ」

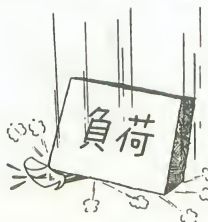
図 b は ある光の強さ以上にならば、リレー接点を  
 ON にしようというわけだす

60 いままでの学習で、トランジスタとはどのような働きをもつものかということと、トランジスタの簡単な応用について学習してきました。

ところで、このようにトランジスタを用いる場合に、注意しなければならないことがあります。

それは、トランジスタに流す電流や、加える電圧の大きさです。

むやみに大きな電流を流したり、大きな電圧を加えたりすると、トランジスタは破損してしまいます。



「暴飲暴食は  
 からだをこわすもと」

61 いままでは  $I_c$  や  $I_b$  , あるいは電源  $V_{cc}$  の大きさについては何も触れませんでした, これらの大きさにはそれぞれ制限があります。

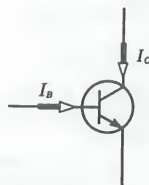
$I_c$  や  $I_b$  については, 最大コレクタ電流 ( $I_{cmax}$ ) または最大ベース電流 ( $I_{bmax}$ ) として, この値を規定しています。

最大コレクタ電流とは, トランジスタのコレクタに流してもよい最大のコレクタ電流の値のことであり, 最大ベース電流とは, ベースに流してもよい最大のベース電流の値のことです。

つぎの表は, 2SD318 というトランジスタの最大コレクタ電流と最大ベース電流の値を示したものです。

2SD318

最大コレクタ電流 ( $I_{cmax}$ )	3 [A]
最大ベース電流 ( $I_{bmax}$ )	1 [A]



「これらの定数は  
必ず守って下さいヨ」

ハイ わかりました

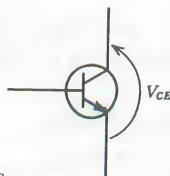
62 同様に, 電源  $V_{cc}$  の大きさについても, トランジスタのコレクタ・エミッタ間にかかる電圧 ( $V_{CE}$ ) の値で規定しています。

すなわち, トランジスタのコレクタ・エミッタ間に加えてもよい最大の値を最大コレクタ・エミッタ電圧 ( $V_{CEmax}$ ) といいます。

2SD318 の場合は, この電圧  $V_{CE}$  の値が \_\_\_\_\_ [V] を越えないようにして使用する必要があります。

2SD318

最大コレクタ・エミッタ電圧 ( $V_{CEmax}$ )	60 [V]
-------------------------------	--------



60

63 トランジスタを用いる場合, これらの制限値を必ず守るようにしないと, 正常な動作を得ることができないばかりか, トランジスタを破損させてしまうことになりますから, 注意してください。

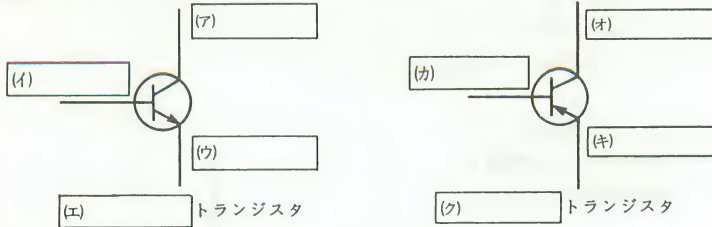
「どうも  
ご苦労さん でした」

## 練習問題

1 つぎの文章や図の \_\_\_\_\_ の中に適する言葉を入れ、文章を完成しなさい。

(1) 図はトランジスタの図記号です。

3本の端子の名称、およびNPNトランジスタかPNPトランジスタかをそれぞれ図中に記入してください。

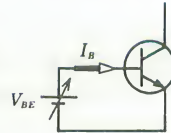


(2) トランジスタの品番が2SD……となっているのは \_\_\_\_\_ トランジスタであることを意味しています。

(3) トランジスタは、ベース・エミッタ間に流す電流 ( $I_B$ ) によってコレクタ・エミッタ間に流れる電流 ( $I_C$ ) を制御する働きをもっていますが、 $I_C$  は  $I_B$  の  $h_{FE}$  倍に制御されます。

この  $h_{FE}$  のことを \_\_\_\_\_ といっています。

(4) トランジスタのベース・エミッタ間に図のように電源  $V_{BE}$  を接続し、その電圧を0[V]から上昇させていったとき、ベース電流が急激に増加し始めるのは \_\_\_\_\_ [V]程度からです。

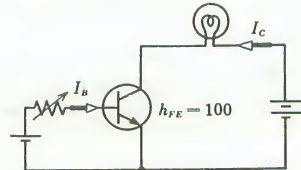


2  $h_{FE}$  が100のトランジスタを用いて図のような回路をつくり、ベース電流  $I_B$  の値をつぎのように変化させると、ランプに流れる電流  $I_C$  はどのようにになりますか。

$$I_B = 50 [\mu A] \Rightarrow I_C = \underline{\text{(ア)}}$$

$$I_B = 100 [\mu A] \Rightarrow I_C = \underline{\text{(イ)}}$$

$$I_B = 150 [\mu A] \Rightarrow I_C = \underline{\text{(ウ)}}$$



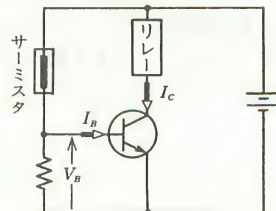
3 図は、サーミスタを用いてリレーを働かせようとした回路です。

つぎの問いに答えなさい。

(1) 温度が上昇すると  $V_B$  はどうなりますか。

(2)  $I_B$  が流れ始めるのは  $V_B$  の値がおよそ何ボルトからです。

(3) 温度が上昇すると  $I_C$  はどうなりますか。



# 3. 電 圧 増 幅

## 学 習 の 目 標

1. トランジスタを用いた電圧増幅器の概要を知る。
2. 実際の電圧増幅器がどのようなになっているのかを知り、必要な電圧増幅器をどのようにすればつくれるのかを学習する。
  - (1) トランジスタの特性にはバラツキがあることを知り、実際の電圧増幅器がどのようにしてこれに対処しているのか、また具体的に回路定数をどのように選んでいるのかを学習する。
  - (2) 任意の入力電圧レベルからの信号を増幅するにはどのようにすればよいのかを学習する。



## 学習の概要

### 1. 電圧増幅器

- (1) 電圧増幅器とは、小さな電圧変化を大きな電圧変化に増幅する働きをもつもので、図のような回路構成になっています。
- (2) 増幅したい入力電圧  $V_B$  をベース・エミッタ間に加え、出力電圧はコレクタ・エミッタ間から取り出します。
- (3) 回路動作はつぎのようになります。

入力電圧が0.6[V]から  
すこし増加する

⇒

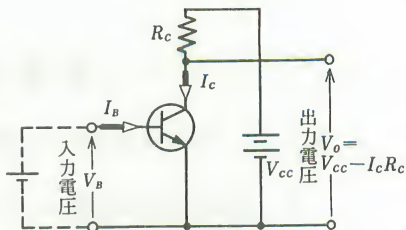
$I_B$ が急激に  
増加する

↓

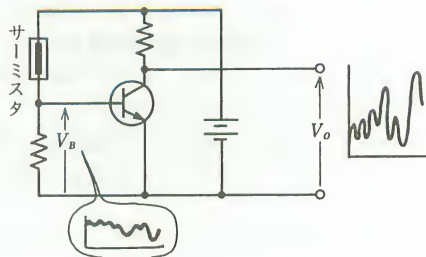
$R_C$ によって電圧降下を  
起こし、 $V_O$ が減少する

⇐

$I_C$ が急激に  
増加する



- (4) このような電圧増幅器は、入力電圧が上昇すると出力電圧が低下するという動作をします。
- (5) 入力電圧の変化に対する出力電圧の変化を電圧増幅度といっています。
- (6) 図のようにサーミスタと抵抗を接続すると、サーミスタからの検出電圧  $V_B$  の変化分を増幅することができます。

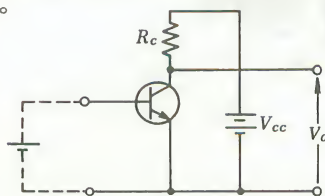


### 2. 電圧増幅器の基本回路

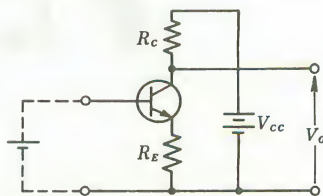
- (1) 図 a のような基本増幅器は電圧増幅度が非常に高いのですが、トランジスタのバラツキを考慮すると、特別の場合を除いて電圧増幅器としては使用できません。

トランジスタの電流増幅率  $h_{FE}$  の値は、同一品種のものでもかなりバラツキがあります。

一般には、図 b のようにエミッタ回路に抵抗  $R_E$  を接続したものを使用しています。



(図 a)

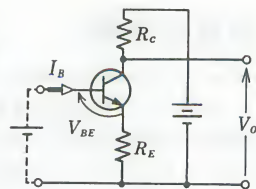


(図 b)



- (2) 図 c のようにエミッタ回路に抵抗を接続すると、トランジスタがつぎのような特性をもっていれば、必要な動作をほぼ正確に得ることができます。

- ①  $V_{BE}$  に対する  $I_B$  の特性が  $V_{BE}=0.7[V]$  の付近で急激に立ち上がっている。
- ② 得ようとする電圧増幅度よりも  $h_{FE}$  の値がじゅうぶんに大きい。

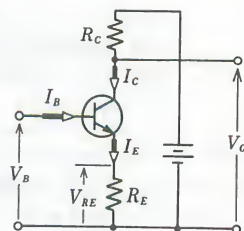


(図 c)

- (3) 図 d のようにエミッタ回路に抵抗  $R_E$  を接続した回路では、 $I_C$ 、 $I_E$ 、および電圧増幅度の値が次式的ようになって  $h_{FE}$  に無関係になります。

$$I_C \div I_E = \frac{V_B - 0.7}{R_E}$$

$$\text{電圧増幅度} = \frac{\text{コレクタ抵抗 } (R_C)}{\text{エミッタ抵抗 } (R_E)}$$



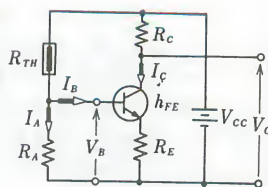
(図 d)

- (4) しかし、ベース電流の値は次式的ようになって、 $h_{FE}$  の値によってバラつきます。

$$I_B = \frac{I_C}{h_{FE}}$$

- (5) 図 e のようにサーミスタからの検出電圧  $V_B$  を増幅するような回路では、 $I_B$  のバラツキによって入力電圧  $V_B$  が変化しないように、 $I_B$  の値に対して  $I_A$  の値をじゅうぶん大きくとっておく必要があります。

一般には、 $I_B$  に対して  $I_A$  の値を 10 倍程度にしています。

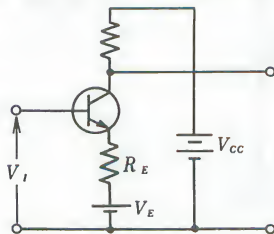


(図 e)

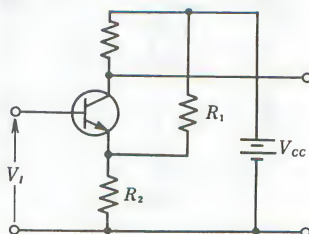
### 3. 任意の入力電圧レベルからの電圧増幅器

図 a のようにエミッタ回路に電源  $V_E$  を接続すると、入力電圧  $V_i$  が  $V_i = V_E + 0.7[V]$  以上のレベルからトランジスタが動作し、増幅ようになります。

- (1)  $V_E = 2[V]$  の場合は入力電圧レベルが  $2.7[V]$  から増幅します。
- (2) 一般には図 b のように抵抗  $R_1$ 、 $R_2$  を用いて  $R_E$  や  $V_E$  を得ています。



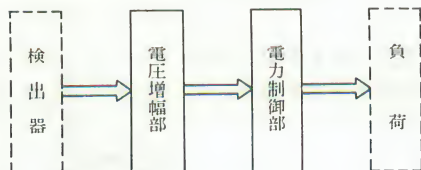
(図 a)



(図 b)

## 学 習 の 展 開

1 前章では、制御部が基本的に、つぎのように電圧増幅部、電力制御部から構成されていることを学習し、その中心的な役割を果たすトランジスタについて学習してきました。

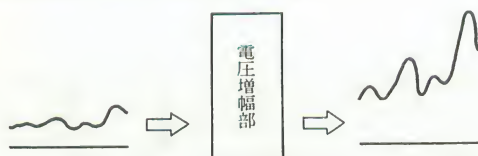


「電流制御機能  
電圧制御機能  
覚えていますね。」

ハイ ハイ  
準備 OK

2 そこで、この章では電圧増幅部について学習し、トランジスタをどのように活用すれば、このような働きをさせることができるのかということをしらべていきましょう。

電力制御部については、次章で学習します。

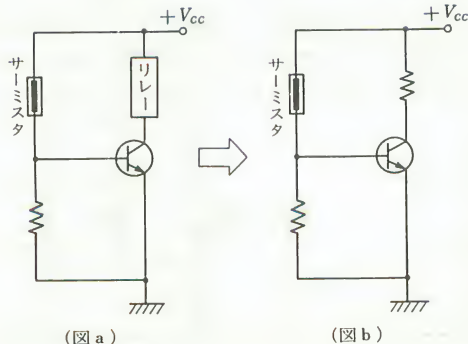


「この章から少し  
ビッチを上げていきます  
から、頑張ってください」

おき 柔らかに

3 図 a の回路は、第 2 章でトランジスタの応用回路の一例として示したもので、温度によってリレーを働かせようとする回路です。

この回路で、リレーのところを図 b のように抵抗に置きかえたときの動作をみてみましょう。



エーット  
 $V_{BE}$  増加  
 $\downarrow$   
 $I_B$  増加  
 $\downarrow$   
 $I_C$  増加  
 $\downarrow$   
 リレー「ON」ということかな

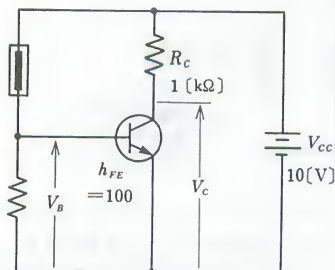
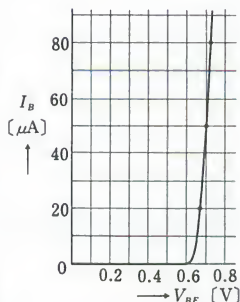
「それだけ わかれは十分」

4 図のような特性をもつトランジスタを使用した場合、電圧  $V_B$  が温度変化によって  $0.675[\text{V}]$  から  $0.725[\text{V}]$  に変化したときのコレクタ電圧  $V_C$  の値を求めてみてください。

$V_C$  の値は、電源電圧  $V_{CC}$  から抵抗  $R_C$  による電圧降下  $I_C R_C$  を引いたものになります。

$$V_B = 0.675[\text{V}] \Rightarrow I_B = \text{(ア)} \Rightarrow I_C = \text{(イ)} \Rightarrow V_C = \text{(ウ)}$$

$$V_B = 0.725[\text{V}] \Rightarrow I_B = \text{(エ)} \Rightarrow I_C = \text{(オ)} \Rightarrow V_C = \text{(カ)}$$



「順序よく考えることが  
大切ですよ……」

(ア)  $20[\mu\text{A}]$

(イ)  $2[\text{mA}]$

(ウ)  $8[\text{V}]$

(エ)  $80[\mu\text{A}]$

(オ)  $8[\text{mA}]$

(カ)  $2[\text{V}]$

5  $V_C$  の値はどのようになりましたか。

温度が上昇して  $V_{BE}$  の値が  $0.675[\text{V}]$  から  $0.725[\text{V}]$  に、 $0.05[\text{V}]$  だけ変化すると、 $V_C$  の値は(ア)  $[\text{V}]$  から(イ)  $[\text{V}]$  に、(ウ)  $[\text{V}]$  も変化するようになりましたね。

すなわち、点 a の端子を入力端子とし、点 b の端子を出力端子とすると、入力電圧の  $0.05[\text{V}]$  の電圧変化に対して、その 120 倍の(エ)  $[\text{V}]$  もの大きな出力電圧の変化を得ることができたということになります。

このようなことから、図中の破線で示した回路を電圧増幅回路といい、この変化の倍率を電圧増幅度といっています。

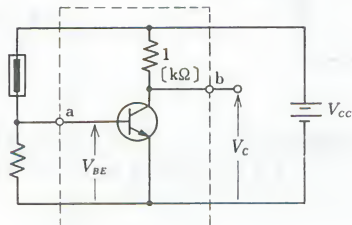
いまの場合は、120 倍の(オ)  $[\text{V}]$  をもつ電圧増幅器ということになります。

(ア) 8 (イ) 2

(ウ) 6

(エ) 6

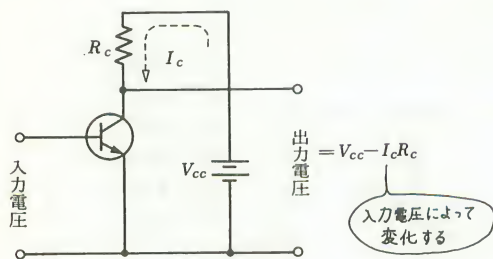
(オ) 電圧増幅度



ナルホド  
コレクタに抵抗を  
入れれば いいわけか  
簡単だなぁ

6 すなわち、電圧増幅器は第2章で学習したトランジスタのコレクタ電流の変化を、抵抗を接続することによって電圧の変化として取り出しているだけのことです。

その基本は、入力電圧の変化によってコレクタ電流  $I_c$  が変化するところにあるわけです。



フン フレ  
トランジスタの  
電圧制御機能 だナ

7 しかし、ここで注意しなければならないことがあります。

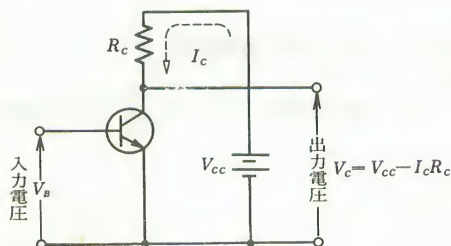
それは、入力電圧 ( $V_B$ ) が上昇したり下降したりした場合に、出力電圧 ( $V_C$ ) がどのように変化するかということです。

(1)  $V_B$  が上昇する  $\Rightarrow I_B, I_c$  が増加する  $\Rightarrow R_c$  の電圧降下が大きくなる  $\Rightarrow V_C$  が(ア) \_\_\_\_\_ する。

(ア) 減少

(2)  $V_B$  が下降する  $\Rightarrow I_B, I_c$  が減少する  $\Rightarrow R_c$  の電圧降下が小さくなる  $\Rightarrow V_C$  が(イ) \_\_\_\_\_ する。

(イ) 上昇



「さほど」  
入力電圧と出力電圧の変化は  
逆になるわけだ。

「そう  
電圧の方向が  
逆に「さほど」」

すなわち、入力電圧が上昇すると出力電圧が(ウ) \_\_\_\_\_ し、入力電圧が下降すると出力電圧が(エ) \_\_\_\_\_ することになります。

(ウ) 下降 (減少)

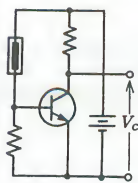
(エ) 上昇



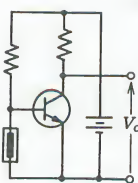
8 トランジスタを用いた電圧増幅器では、このように入力の電圧と出力の電圧とは、変化の方向が逆になります。

したがって、図 a のようにサーミスタを接続して、その検出電圧を増幅すると、温度の上昇とともに出力電圧が低下するわけです。

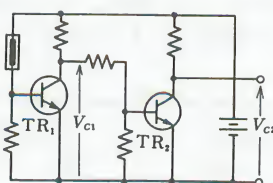
このような変化のしかたではこまる場合には、図 b のようにサーミスタをベース・エミッタ間に入れたり、または図 c のようにトランジスタ  $TR_1$  で増幅されてきた出力 ( $V_{c1}$ ) を、もう一度トランジスタ  $TR_2$  で増幅するなどといった方法が用いられています。



(図a) 温度が上昇すると  $V_c$  が減少する。



(図b) 温度が上昇すると  $V_c$  が増加する。



(図c) 温度が上昇すると  $V_{c1}$  が減少し、 $V_{c2}$  が増加する。

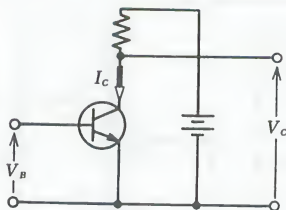
「回路の動作は  
わかるかな」

$V_{BE} \Rightarrow I_B \Rightarrow I_C \Rightarrow V_c$  と  
追っていわば  
いいわけでしょう

「そうですヨ」

9 いままで、検出器からの小さな電圧変化を大きな電圧変化に増幅するためのトランジスタ回路について学習してきました。

しかし、図のような回路は、入力電圧  $V_{BE}$  のわずかな変化で非常に大きなコレクタ電流や出力電圧の変化が得られるわけですが、このような回路は実際上ではすこし問題があります。



ホー  
どんなことかな

「次のフレームへ  
じうぞ」

10 これまで回路の動作を考える場合は、トランジスタの  $h_{FE}$  が一定であるとして取り扱ってきました。

しかし、トランジスタのような半導体素子の特性は、実は非常にバラツキが激しいのです。

つぎに示す  $h_{FE}$  は 2SC1684(0) と呼ばれているトランジスタの値ですが、最小の値が 90 であるのに対して最大の値はいくらになっていますか。

2SC1684(0) の $h_{FE}$	最小値	標準値	最大値
	90		150

150

フュー、  
同じ品番なのに、こんなに  
差があるんですか



11 トランジスタを使用する場合は、このようなバラツキを前提として考えておかねばなりません。

これを無視して使用した場合は、たとえ回路を組んでも必要とするコレクタ電流 ( $I_C$ ) や出力電圧 ( $V_C$ ) を得ることはできません。

$h_{FE}$  が バラバラじゃ  
ヤリにくい ナア

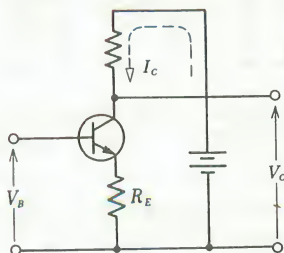
「技術があれば 大丈夫さ」

12 そこで実際には、このようなバラツキがあっても実質的に影響がないようなくふうをしています。

この章では、このような方法について学習し、それを基本にして実際の電圧増幅器について学習していきたいと思います。

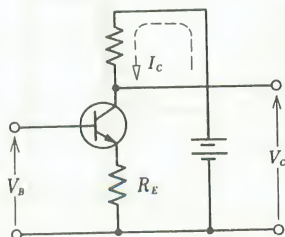
ようすく  
お願いします

13 トランジスタを用いた電圧増幅器では、図のようにエミッタ回路に抵抗  $R_E$  を接続することによって、安定したコレクタ電流 ( $I_C$ ) や出力電圧 ( $V_C$ ) を得ようとしています。



「 $R_E$  は なかなか効果がありますヨ」

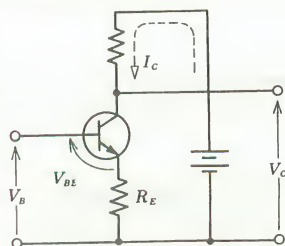
14 このようにエミッタ回路に抵抗を入れると、 $h_{FE}$  がある程度以上の値をもったトランジスタであれば、たとえ  $h_{FE}$  が 90 であっても 150 であっても、 $I_C$  や  $V_C$  はほぼ安定した値で動作させることができますようになります。



「 $V_B$  が 同じなら  $I_C$  や  $V_C$  が  
同じ値に なりますヨ」

15 つまり、図のように  $R_E$  を入れると、 $I_C$  の値はほぼつぎのように表されるようになって、 $h_{FE}$  の値には無関係になります。

$$I_C = \frac{V_B - V_{BE}}{R_E}$$

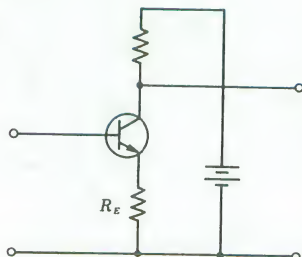


フーン  
なぜだろう？

「次のフレームへ  
どうぞ」

16 では、なぜエミッタ回路に抵抗  $R_E$  を接続すると、このような動作をするのでしょうか。

その動作をみていきましょう。



ウン

これは はっきり  
せにゃ ばうん

「その考え  
その意識」

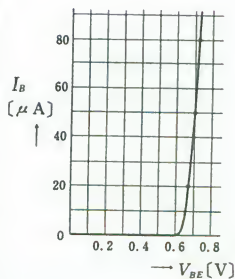
17 図 b のようにエミッタ回路に抵抗  $R_E$  を接続して、電圧  $V_B$  の値を大きくしていくと、図 a の  $V_{BE}-I_B$  特性でわかるように、 $V_B$  の値がほぼ  $0.6[V]$  までの場合はベース電流が流れませんから、 $I_C$  も流れず、 $I_E$  も流れません。

したがって、 $R_E$  による電圧降下も (ア) [V] となります。 (ア) 0

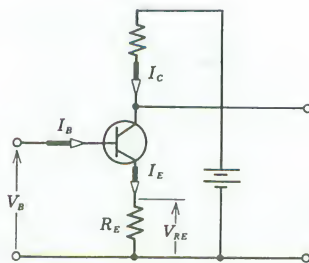
次に、 $V_B$  の値が  $0.6[V]$  を越えると、 $I_B$  がすこしずつ流れ始めます。

$I_B$  が流れると、その  $h_{FE}$  倍の  $I_C$  が流れますが、エミッタにはこの  $I_B$  と  $I_C$  の両方が流れますから、 $R_E$  の両端にはつぎのような電圧降下  $V_{RE}$  が生じます。

$$V_{RE} = \boxed{(イ)} \times R_E = (I_B + I_C) R_E \quad (イ) I_E$$



(図 a)

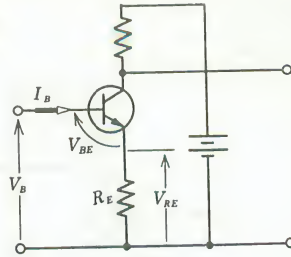


(図 b)

18 では、この  $V_{BE}$  の値は入力電圧  $V_B$  とどのような関係にあるのでしょうか。

まず、図 b のトランジスタの  $V_{BE}-I_B$  特性をみてください。

$V_{BE}$  の値はベース電流  $I_B$  の値にほとんど関係なく、ほぼ 0.7 [V] 近くの値になっています。



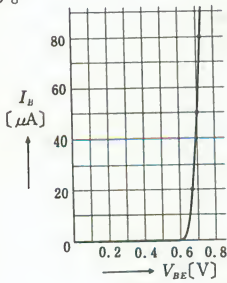
(図 a)

$$I_B = 20 [\mu A] \text{ のとき} \Rightarrow V_{BE} \doteq (\text{ア}) \text{ [V]}$$

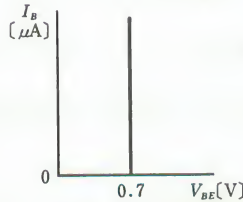
$$I_B = 50 [\mu A] \text{ のとき} \Rightarrow V_{BE} \doteq (\text{イ}) \text{ [V]}$$

$$I_B = 80 [\mu A] \text{ のとき} \Rightarrow V_{BE} \doteq (\text{ウ}) \text{ [V]}$$

そこで、この特性を図 c のような形に近似してしまおうとどうでしょう。



(図 b)



(図 c)

(ア) 0.67

(イ) 0.7

(ウ) 0.72

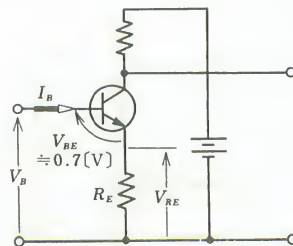
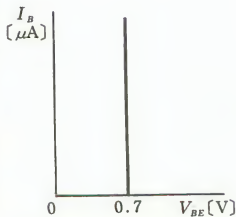
フン フン

 $I_B$  が かなり変わっても、 $V_{BE}$  は (ほとんど) 0.7 [V]

近辺だからなあ……

よし！ 割り切ってしまおう

19 このように近似できれば、 $V_{BE}$  の値はベース電流  $I_B$  の値にほぼ無関係に常に 0.7 [V] ということになりますから、図の回路の抵抗  $R_E$  における電圧降下  $V_{RE}$  は、入力電圧  $V_B$  から 0.7 [V] を引いた値になると考えることができます。



フンフン

 $V_{BE}$  での電圧降下の

常に 0.7 [V] とすると

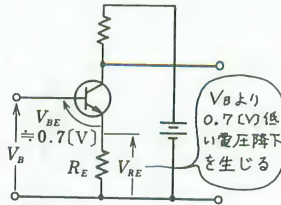
 $V_B - 0.7$  が  $V_{RE}$  だ。「 $V_{BE} = 0.7$  と

いうのが ポイントアヨ」

エミッタに抵抗を入れてトランジスタを利用していく場合、実質的にはこのような近似をしてもまったく問題ありません。

20 つまり、トランジスタのエミッタ回路に抵抗  $R_E$  を接続した場合、 $R_E$  には入力電圧  $V_B$  の値より [V] だけ低い値の電圧降下  $V_{RE}$  を常に生じることにあります。

$$V_{RE} = V_B - 0.7$$

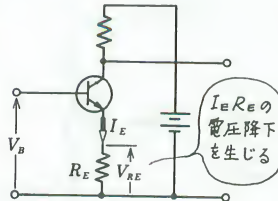


0.7

ハイ、わかりました

21 一方、この電圧降下  $V_{RE}$  は、エミッタ電流  $I_E$  による  $R_E$  での電圧降下によって生じているわけです。

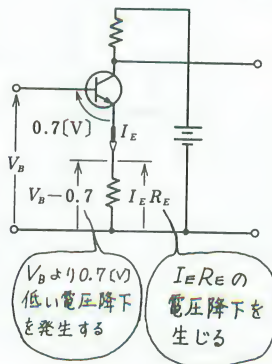
$$V_{RE} = \boxed{\phantom{000}} \times R_E$$

 $I_E$ 

フン フレ  
これは OK

22 つまり、図のような回路の抵抗  $R_E$  には、入力電圧から 0.7[V] だけ低い値の電圧降下  $V_{RE}$  を生じるようになり、また、このような大きさの電圧降下 ( $V_{RE} = I_E R_E$ ) が生じるようなエミッタ電流 ( $I_E$ ) が流れるようになるわけです。

この関係は、エミッタ回路に抵抗が接続されている回路の動作を考える場合のポイントとなる非常に重要な関係ですから、しっかり理解しておいてください。



$V_{RE}$  は  $I_E R_E$  によって生じ、  
そして、その大きさは  
 $V_B - 0.7$  に定まると  
いうことだね

「そう  
そこがポイントだよ」

したがって、このような関係から、エミッタ電流  $I_E$  はつぎのようになります。

$$\left. \begin{array}{l} V_{RE} = V_B - 0.7 \\ V_{RE} = I_E R_E \end{array} \right\} \Rightarrow I_E R_E = V_B - 0.7$$

$$\therefore I_E = \frac{\boxed{\phantom{000}}}{R_E}$$

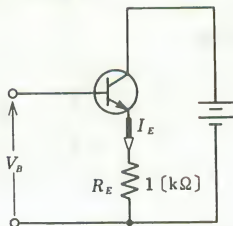
 $V_B - 0.7$

23 それでは、図の回路に2[V]の入力電圧 $V_B$ を加えた場合、エミッタ電流 $I_E$ がどのようなになるかを求めてください。

$$V_{RE} = V_B - (ア) = 1.3[V]$$

$$V_{RE} = I_E R_E$$

$$I_E = \frac{(イ)}{(ウ)} = 1.3 [mA]$$



(ア) 0.7

(イ)  $V_{RE}$

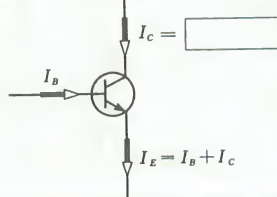
(ウ)  $R_E$

「この関係はしっかりと覚えて下さいね」

24 エミッタ回路に抵抗を入れたとき、入力電圧 $V_B$ に対してエミッタ電流 $I_E$ がどのようなになるか、理解できましたね。

では次に、 $I_C$ の値がどのようなになるか考えてみましょう。

すでに学んだように、エミッタ電流 $I_E$ 、コレクタ電流 $I_C$ 、ベース電流 $I_B$ の間には、図のような関係がありましたね。



$h_{FE} I_B$

OK, OK

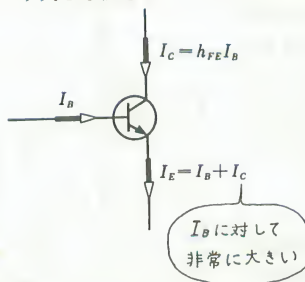
25 ここで $h_{FE}$ が100とか200という大きな値をもっているとどうなるでしょうか。

$$I_E = I_B + I_C$$

$$= I_B + h_{FE} I_B$$

$$= (1 + h_{FE}) I_B \approx h_{FE} I_B = I_C$$

すなわち、 $h_{FE}$ が大きいときは $I_C$ の値は $I_B$ に対して非常に大きくなるので、 $I_E$ の値はほぼ\_\_\_\_\_と等しいと考えてさしつかえありません。



$I_C$

「たとえば $h_{FE}$ を100、 $I_B$ を10[μA]とすると、 $I_C$ や $I_E$ はどのような値か」

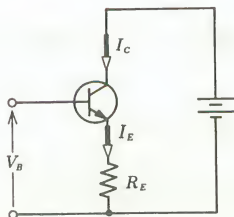
エーファット

$$I_C = 1000 [\mu A]$$

$$I_E = 1010 [\mu A]$$

26 つまり、 $h_{FE}$ の値がじゅうぶんに大きければ $I_E \approx I_C$ となり、 $I_C$ の値は22フレームで求めた $I_E$ の値とほぼ等しくなるわけです。

$$I_C \approx I_E = \frac{V_B - 0.7}{R_E}$$



ナルホド

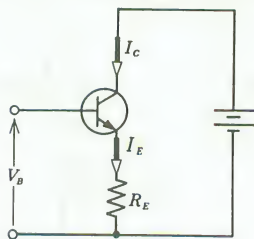
「実算的には $I_E \approx I_C$ と考えて、ほとんど問題ありません」



27 すなわち、 $h_{FE}$  の値がじゅうぶん大きければ、 $I_c$  の値も  $I_E$  と同じく  $\frac{V_B - 0.7}{R_E}$  となります。

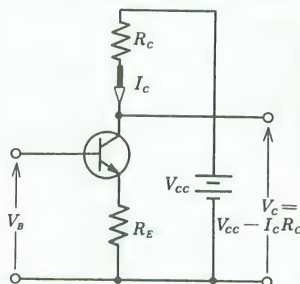
したがって、回路の動作を考える場合に、たとえ  $h_{FE}$  の値がどのようなようになっていても、 $h_{FE}$  の値さえ大きければ、コレクタ電流は

$h_{FE}$  に関係なく、入力  $V_B$  と  $R_E$  の値によって決まるため、安定した値を保つといつてさしつかえないわけです。



ナルホト  
こういうことだったのか

28 こうしてコレクタ電流  $I_c$  が安定した値になれば、出力電圧  $V_c$  は電源電圧  $V_{cc}$  から抵抗  $R_c$  による電圧降下\_\_\_\_\_を引いたものですから、この出力電圧  $V_c$  も  $h_{FE}$  のバラツキによる影響を受けないことになります。



$I_c R_c$

フン フン  
わかる わかる

29 コレクタ電流や出力電圧がどのような値になるかについては、もうじゅうぶんに理解できたと思います。

これらのことは、トランジスタ回路を取り扱ううえで非常にたいせつなことですから、しっかり身につけておいてください。

それではここで、理解を深めるために、すこし例題をやってみましょう ( $h_{FE}$  が非常に大きいとして取り扱ってください)。

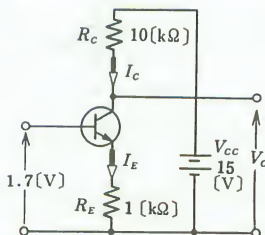
「さあ 腕だめしてすヨ」

30 図の回路で、入力に1.7[V]の電圧を加えたときのエミッタ電流  $I_E$ 、コレクタ電流  $I_c$ 、および出力電圧  $V_c$  の値をそれぞれ求めてください。

$I_E =$  (ア) \_\_\_\_\_ [mA]

$I_c \doteq$  (イ) \_\_\_\_\_ [mA]

$V_c =$  (ウ) \_\_\_\_\_ [V]



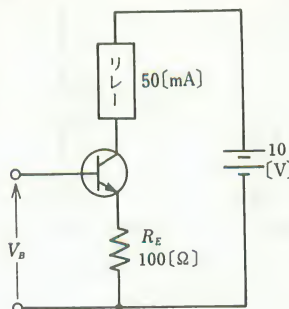
(ア)  $V_{RE} = V_B - 0.7 = 1.0$

$I_E = \frac{V_{RE}}{R_E} = 1 \text{ [mA]}$

(イ)  $I_c \doteq I_E = 1 \text{ [mA]}$

(ウ)  $V_c = V_{cc} - I_c R_c = 5 \text{ [V]}$

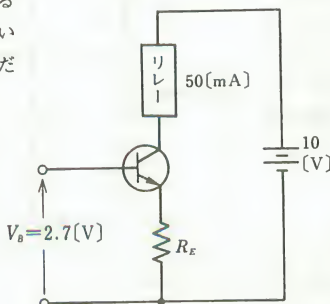
31 次に、図のようにコレクタ回路に 50[mA] で動作するリレーを入れたとき、このリレーを動作させるためには、入力電圧  $V_B$  が何 [V] 以上必要になるかを求めてください。



「少し 変形型  
これか? できれば 80 点。」

$$\begin{aligned} I_E &\doteq I_C = 50[\text{mA}] \\ V_{RE} &= I_E R_E = 5[\text{V}] \\ V_B &= 0.7 + V_{RE} \\ &= 5.7[\text{V}] \end{aligned}$$

32 また、図の回路で入力電圧  $V_B$  が 2.7[V] のときリレーを働かせるようにするには、 $R_E$  の値をいくらにすればよいかを求めてください。



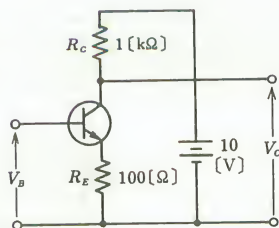
「これか? できれば  
満点、です。」

$$\begin{aligned} I_E &\doteq I_C = 50[\text{mA}] \\ \begin{cases} V_{RE} = V_B - 0.7 \\ V_{RE} = I_E R_E \end{cases} \\ \therefore I_E R_E &= V_B - 0.7 \\ R_E &= \frac{V_B - 0.7}{I_E} \\ &= 40[\Omega] \end{aligned}$$

33 それでは次に、このようにエミッタ回路に抵抗  $R_E$  が接続されている回路の電圧増幅度を求めてみましょう。

図の回路で、 $V_B$  の値が 1 [V] から 1.5 [V] まで 0.5 [V] だけ変化したときの増幅度について考えてみることにします。

まず、 $V_B$  が 1 [V]、1.5 [V] のそれぞれのときの出力電圧  $V_C$  の値を求めてください。



これなら  
簡単、簡単

$$V_B = 1[\text{V}] \text{ のとき} \Rightarrow V_C = \underline{(7)} \text{ [V]}$$

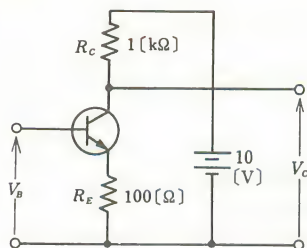
$$V_B = 1.5[\text{V}] \text{ のとき} \Rightarrow V_C = \underline{(1)} \text{ [V]}$$

(7) 7

(1) 2

34 このように、入力電圧  $V_B$  が 1[V] から 1.5[V] まで 0.5[V] 変化すると、出力電圧  $V_C$  は 7[V] から 2[V] まで 5[V] 変化するようになりましたね。

したがって、この回路の電圧増幅度の値は \_\_\_\_\_ となるわけですね。



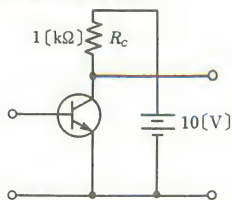
10

ハイ ハイ

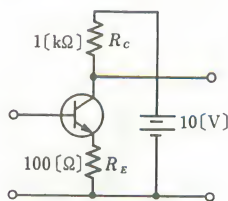
確かに

35 ところで、5フレームに出てきた図 a のような回路の場合には電圧増幅度が120倍というかなり大きな値でしたが、同じトランジスタを用いても、図 b のようにエミッタに抵抗を接続すると増幅度はかなり \_\_\_\_\_ してしまいます。

しかし、トランジスタのパラツキの影響をおさえるためには、これもやむを得ません。



(図 a) 電圧増幅度=120



(図 b) 電圧増幅度=10

ここでは説明を省きますが、図 b のようにエミッタ回路に抵抗  $R_E$  が入っている回路の電圧増幅度は、トランジスタの  $h_{FE}$  に無関係に  $\frac{R_C}{R_E}$  となります。

「この基本的な考え方は  
第10章で学習します。  
あとのおたのしみ。」

36 いままでの学習で、エミッタ回路に抵抗が入ったときの動作については理解できたと思います。

実際の電圧増幅器にも、このようにエミッタ回路に抵抗を入れたものが使われています。

ところで、このようにエミッタ回路に抵抗  $R_E$  を接続した増幅回路の場合、もう一つ問題が残ります。

それは、ベース電流によって生じる問題です。

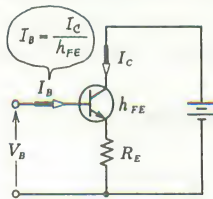
ここまですべて  
休みの時間

37 すでに学んだように、図のような回路では、 $I_E$ の値はトランジスタの $h_{FE}$ のパラツキに関係がなく、つぎのようになりました。

$$I_C \doteq I_E = \frac{V_B - 0.7}{R_E}$$

ところで、 $I_B$ についてはどうでしょうか。

$I_B$ の値は $I_C$ の $1/h_{FE}$ ですから、 $h_{FE}$ のパラツキによって $I_B$ の値は直接影響を受けます。



「 $I_C$ を1[mA]とすると、  
 $h_{FE}$ が100、または200  
のとき、 $I_B$ がどのように  
なるか?」

エーッ

$h_{FE}$ が100  $\Rightarrow I_B = 10 [\mu A]$

$h_{FE}$ が200  $\Rightarrow I_B = 5 [\mu A]$

38 いままで取り扱ってきた図aのような回路の場合には、 $I_B$ がバラついても $V_B$ が変化しませんから、問題はありません。

しかし、図bのような回路の場合はどうでしょうか。

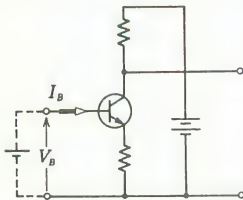
図bの場合、 $I_B$ が流れるということは、 $R_A$ を流れていた電流 $I_A$ の一部がトランジスタ側にも流れるようになるということです。その結果、 $R_A$ に流れる電流 $I_A$ が減少するため、 $R_A$ での電圧降下が減少して $V_B$ の値が\_\_\_\_\_します。

つまり、 $V_B$ の値が $I_B$ の値に左右されてしまうことになりますから、もしも $I_B$ の値が $h_{FE}$ の影響でバラついてしまうと、 $V_B$ がどのような値になるかわからなくなってしまいます。

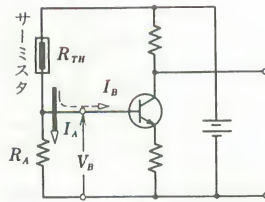
ということは、入力電圧 $V_B$ 自体がトランジスタの $h_{FE}$ によってバラついてしまうことになります。

低下 (減少)

$h_{FE}$ の値によって  
入力電圧が変化しちゃう  
図3なあ

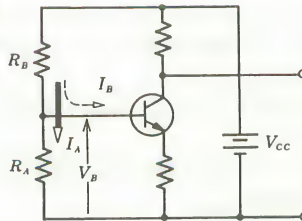


(図 a)



(図 b)

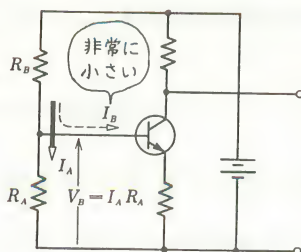
39 そこで、 $I_B$ が流れると入力電圧 $V_B$ が変化する図のような回路では、たとえ $I_B$ がバラついても入力電圧 $V_B$ が影響を受けないようにする必要があります。



$I_A$ の値を大きくとれば  
いいですね  
なぜかな

「次のフレームへどうぞ」

40 図でわかるように、 $I_A$  が  $I_B$  に対してじゅうぶん大きければ、たとえ  $I_B$  がバラついていても、 $I_A$  への影響が非常に少なく、 $V_B$  にはほとんど影響を与えなくなります。

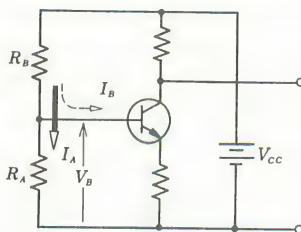


フン フン  
 $I_B$ の値を実質的には、  
0と考えられるように  
するわけだ。

「オーフ！ スゴイネ」

41 このように  $I_A \gg I_B$  の関係が成り立っていれば、入力電圧  $V_B$  の値は  $I_B$  の値を無視して、つぎのように抵抗分割比だけで簡単に求めることができますようになります。

$$V_B = \frac{R_B}{R_A + R_B} V_{CC}$$



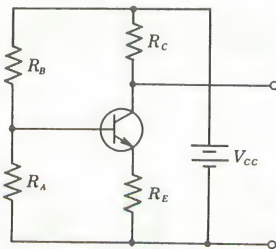
なるほど  
 $I_B$ を0として  
考えればいいんだからなあ

42  $I_A \gg I_B$  の関係は、回路定数の関係からいえば、 $R_A$  と  $R_B$  の並列合成抵抗に対して、 $R_E (1 + h_{FEmin})$  の値が非常に大きいという条件を満たすことで得ることができます。

一般に、この比率は 1 : 10 程度以上に定めるようにしています。  
( $h_{FEmin}$  とは  $h_{FE}$  のバラツキの最小値という意味です)

$$\frac{R_A \cdot R_B}{R_A + R_B} \ll R_E (1 + h_{FEmin})$$

$$1 : 10$$



これらの関係は、電圧増幅にしろ、のちに学習する電力増幅にし、とにかくトランジスタを増幅器として使用する場合、常に心がけなければならないことです。

したがって、しっかり頭に入れておいてください。

なぜ なるのか  
チョット 気になるなあー

でも まあ  $I_A \gg I_B$  の関係  
を得るには、  
こうすればいいと  
覚えておこう



43 いままでの学習で、電圧増幅回路を構成するうえで基本となるつぎのことについて学習してきました。

- (1)  $h_{FE}$  のバラツキに対して、トランジスタ動作をどのように安定にさせるか。
- (2) 回路定数に応じて  $R_E$  の値をどのようにする必要があるか。

このようなトランジスタ回路の取り扱い方は非常に重要なことですから、しっかり把握しておいてください。

それでは、いままでの復習をかねて、例題をやってみましょう。

さあ 読めまして

44 サーマスタを用いた図のような回路で、サーミスタの抵抗値が温度変化によって  $10[\text{k}\Omega]$  から  $15[\text{k}\Omega]$  まで変化する場合、出力電圧  $V_o$  が  $2[\text{V}]$  から  $10[\text{V}]$  まで変化するような回路をつくってみたいと思います。

図の抵抗  $R_A$ ,  $R_E$  の値を求めてみてください。

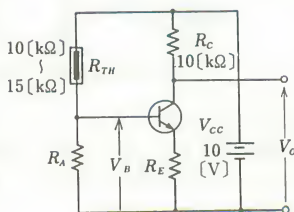
〈考え方〉

①サーミスタの抵抗値が  $15[\text{k}\Omega]$

のときには出力電圧  $V_o$  が  $10[\text{V}]$  ですから、この状態では  $R_c$  での電圧降下を 0 にする必要があります。

すなわち、この状態で  $V_b$  の値を  $0.7[\text{V}]$  にして  $R_E$  での電圧降下を 0 にし、 $I_E$  を 0 とすればいいのです。

②サーミスタの抵抗値が  $10[\text{k}\Omega]$  のときには出力電圧  $V_o$  が  $2[\text{V}]$  ですから、 $R_c$  で  $8[\text{V}]$  の電圧降下を生じるような  $I_c$  を流せばいいわけです。



「これが できたう  
100点ですヨ」

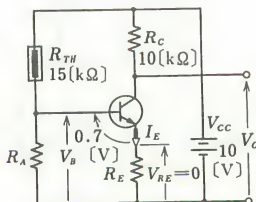
ヨーシ やってみるか

「ちょっと 苦しい人は  
次のフレームを」

45 では、順序立てて考えていきましょう。

まず、サーミスタの抵抗値が  $15[\text{k}\Omega]$  のときにコレクタ電流を 0 にするので、 $V_b$  の値を  $0.7[\text{V}]$  にすればいいことになります。

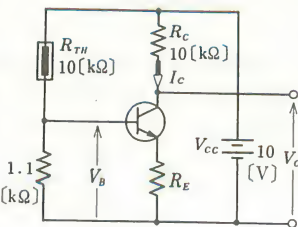
では、 $R_{TH} = 15[\text{k}\Omega]$  のときに  $V_b = 0.7[\text{V}]$  にするには、 $R_A$  の値をいくらにすればいいかを求めてください。



$$\begin{aligned}
 V_b &= \frac{R_A}{R_A + R_{TH}} V_{CC} \\
 V_b R_A + V_b R_{TH} &= R_A V_{CC} \\
 R_A (V_{CC} - V_b) &= V_b R_{TH} \\
 R_A &= \frac{V_b R_{TH}}{V_{CC} - V_b} \\
 &= 1.1[\text{k}\Omega]
 \end{aligned}$$

46 次に、温度が上昇してサーミスタの抵抗値が  $10\text{ [k}\Omega\text{]}$  に変化したとき、出力電圧  $V_o$  を  $2\text{ [V]}$  にするので、この状態では  $I_c$  の値をいくらにすればいいかを求めてください。

また、この状態ではサーミスタ  $[\text{k}\Omega]$  の抵抗値が  $10\text{ [k}\Omega\text{]}$  になっているから、 $V_B$  の値はいくらになっているかを求めてください。



$$I_c \dots\dots\dots$$

$$V_{CC} - R_C I_c = 2$$

$$I_c = \frac{V_{CC} - 2}{R_C}$$

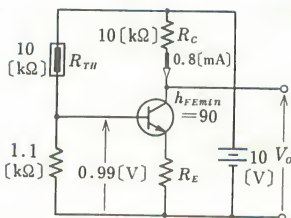
$$= 0.8\text{ [mA]}$$

$$V_B \dots\dots\dots$$

$$V_B = \frac{R_A}{R_{TH} + R_A} V_{CC}$$

$$= 0.99\text{ [V]}$$

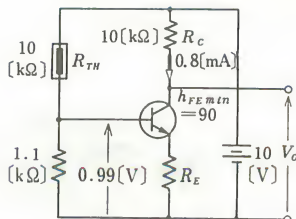
47 では、 $V_B = 0.99\text{ [V]}$  の状態で  $I_c = 0.8\text{ [mA]}$  にするためには、 $R_E$  の値がいくらであればよいかを求めてください。



$$I_c \doteq I_E = \frac{V_B - 0.7}{R_E}$$

$$R_E = \frac{V_B - 0.7}{I_c} \doteq 360\text{ [}\Omega\text{]}$$

48 また、つぎの関係が成立しているかどうかを確かめてください。



$$\frac{R_A R_B}{R_A + R_B} \ll R_E (1 + h_{FEmin})$$

$$\frac{R_A R_B}{R_A + R_B} \ll R_E (1 + h_{FEmin})$$

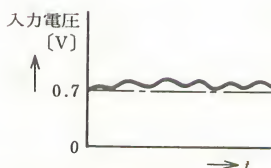
$$0.99\text{ [k}\Omega\text{]} \quad 32\text{ [k}\Omega\text{]}$$

もしメダったら どうするの  
「第4章 で取り扱います」

49 これまでの学習で、トランジスタの  $h_{FE}$  がバラついていても、定められた動作を正確に行わせるにはどうすればよいかということについて考えてきました。

ところで、いままで考えてきたトランジスタ動作は、入力電圧が常に  $0.7\text{ [V]}$  以上になるとベース電流が流れ始め、増幅動作にはいっているようになっていました。

つまり、 $0.7\text{ [V]}$  以上の入力電圧に対して増幅を行っていたわけです。



「あと、サレですよ  
もう、びとふんばり」

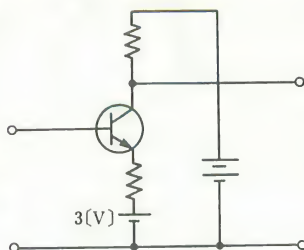
50 しかし、このように  $0.7[V]$  に基準が固定されていると不便な場合も考えられます。

たとえば、 $2[V]$  以上の入力電圧に対して増幅させたい場合もありますし、 $3[V]$  以上から増幅させたいという場合もあります。

では最後に、このような場合はどうすればよいのかを学習していきましょう。

図のようにエミッタ回路に電源を接続してみるとどうでしょう。

たとえば、 $3[V]$  の電源を接続してみましょう。

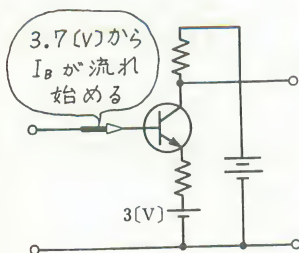


どのようなように使えますか

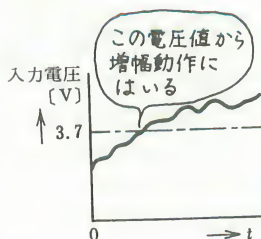
「4章、5章ではこの応用がてきますよ」

51 こうすれば、ベースに電流が流れ始めるのは、 $V_B$  に  $[V]$  以上の電圧が加わったときになります。

つまり、この回路は  $3.7[V]$  以上の電圧に対してベース電流を流し、増幅動作にはいるということです。



(図 a)



(図 b)

3.7

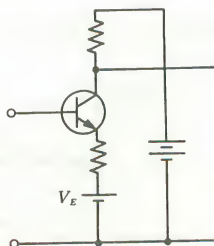
フシ フシ

ベース・エミッタ間の電圧  $V_{BE}$  は  $0.7[V]$  だろうか

「そういうこと」

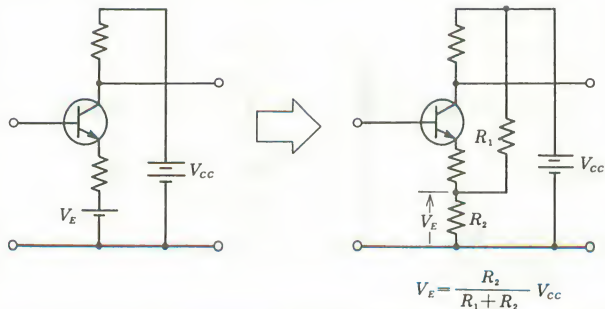
52 このような方法を用いると、増幅させたい入力電圧の値を自由に設定できるようになります。

こうした方法は、実際の回路にしばしば用いられていますから、この考え方はじゅうぶん理解しておいてください。



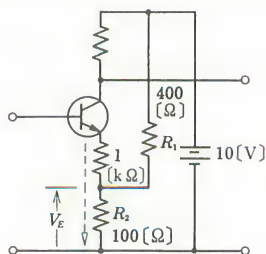
ハイ、よくわかりました。

53 ところで、別電源をこのようなところで使うのは実際にはめんどいので、一般には図のように抵抗  $R_1$ ,  $R_2$  を用いて電源電圧を分圧する方法などが用いられています。



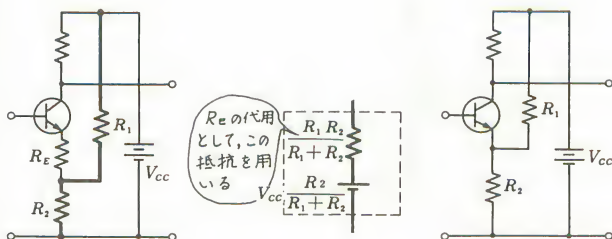
ナルホド  
ナルホド

54 図の回路は、 $R_1=400[\Omega]$ ,  $R_2=100[\Omega]$  の抵抗を使用していますから、 $V_E = \underline{\hspace{2cm}} [V]$  となり、2.7[V] 以上の入力電圧に対して増幅するようになります。



2

55 ところで、図 a の  $R_1$  と  $R_2$  による分圧回路が、図 b のような等価回路で示されますから、この等価回路中の抵抗を、いままでの  $R_E$  の代用として使用し、図 c のような形にして使用する場合もあります。



(図 a)

(図 b)

(図 c)

「どうも  
ご苦労さんでした」

# 練習問題

1 図の回路は、サーミスタで温度を検出し、その検出電圧を増幅しようとする回路です。

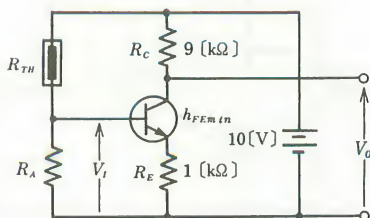
(1) トランジスタのバラツキによる影響をおさえる働きをしているのは、どの部品ですか。

(2)  $R_E$ での電圧降下 ( $V_{RE}$ )は  $V_i$ とどのような関係がありますか。

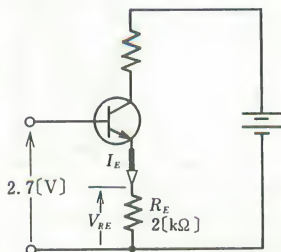
(3) この回路の電圧増幅度はいくらになりますか。

(4) ベース電流  $I_B$  と  $R_A$  を流れる電流  $I_A$ との間にはどのような関係が必要ですか。

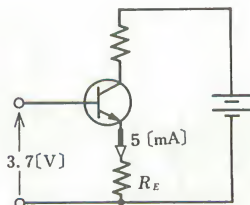
(5)  $R_E$  と  $R_{TH}$ ,  $R_A$ ,  $h_{FEmin}$  との間には、どのような関係が必要ですか。



2 図の回路で  $2.7[V]$  の入力電圧を加えたとき、 $V_{RE}$ ,  $I_E$  の値はいくらになりますか。



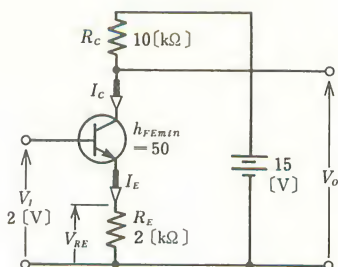
3 図の回路で入力電圧が  $3.7[V]$  のとき  $I_E = 5[mA]$  にするには、 $R_E$  の値をいくらにする必要がありますか。



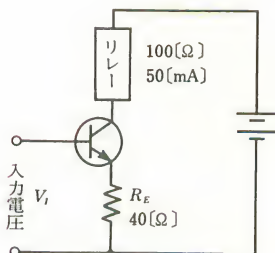


4 図の回路について、つぎの問いに答えなさい。

- (1)  $V_i = 2 \text{ [V]}$  のとき  $V_{RE}$ ,  $I_E$ ,  $I_C$  はいくらかになりますか。
- (2)  $V_i$  が  $1.7 \text{ [V]}$  から  $2.2 \text{ [V]}$  に変化したとき、出力電圧  $V_o$  の値はどのようにになりますか。
- (3) この回路の電圧増幅度 ( $A$ ) はいくらかになりますか。

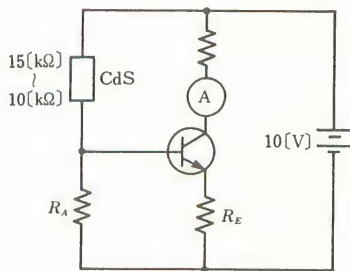


5 図の回路で、リレーを動作させるためには何 [V] の入力電圧が必要ですか。

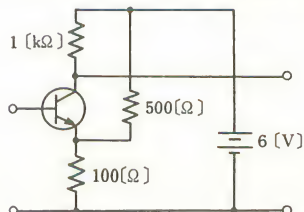


6 図は、CdSを用いて光の強さを検出し、それに応じて電流計をふらせようとした回路です。

CdSの抵抗値が  $15 \text{ [kΩ]}$  のときには電流計のふれがほぼ  $0$  となり、抵抗値が減少して  $10 \text{ [kΩ]}$  になったときには  $5 \text{ [mA]}$  を示すようにするには抵抗  $R_A$ ,  $R_E$  をいくらかにすればいいか求めなさい。



7 図の回路では、入力電圧  $V_i$  が何 [V] 以上になればコレクタ電流が流れるようになりますか。

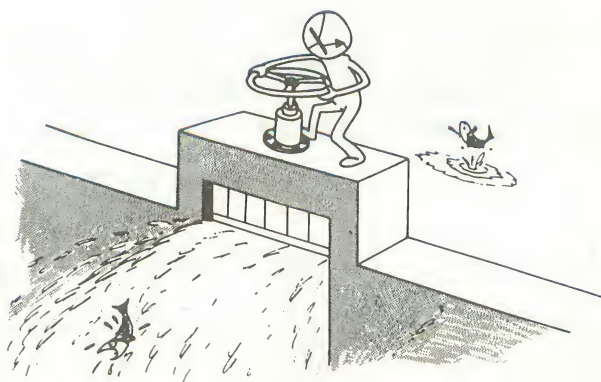




# 4. 電 力 制 御

## 学 習 の 目 標

1. 電力制御部の必要性を知り、その基本回路がどのような構成になっているのかを学習する。
2. 電力制御回路の各回路定数をどのように設定しなければならないのかを学習する。
3. モータを駆動する場合などで、回転速度だけでなく、回転方向も制御できる方法を学習する。
4. 電力制御回路を構成するうえで注意しなければならないことについて学習する。

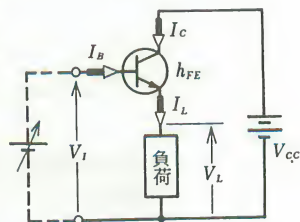


## 学習の概要

### 1. 電力制御

入力電圧からはほとんど電流を取り出さずに、入力電圧の大きさに応じて負荷に加わる電力を制御するための回路を電力制御回路とっています。

- (1) 図のようにトランジスタのエミッタ回路に負荷を接続すると、入力電圧に応じて電源  $V_{CC}$  から負荷に加わる電力を制御することができるようになります。



- ① 入力電圧  $V_i$  によって負荷に加わる電圧  $V_L$  が制御され、負荷に加わる電力  $\left(\frac{V_L^2}{R_L}\right)$  が制御

されます。

- ② 負荷に流れる電流のほとんどは  $V_{CC}$  から供給されており、入力電圧  $V_i$  からの電流 ( $I_b$ ) はほとんど必要としません。

- (2) 図の電力制御回路では、入力電圧  $V_i$  から取り出される電流はおよそ  $I_L / h_{FE}$  となります。

この電流さえも問題になる場合は、トランジスタの  $h_{FE}$  の値をさらに大きくする必要があります。

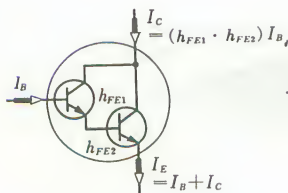
### 2. ダーリントン接続

- (1) 図 a や図 b のように二つのトランジスタを接続すると、等価的に非常に大きな  $h_{FE}$  をもつ一つのトランジスタとして動作します。

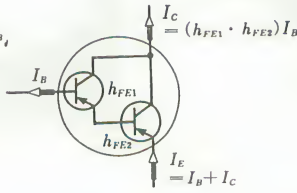
このような接続法をダーリントン接続とっています。

ダーリントン接続をすると、等価的な  $h_{FE}$  は  $h_{FE1} \cdot h_{FE2}$  となります。

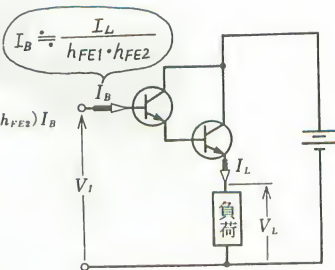
- (2) 図 c のように電力制御回路にダーリントン接続を利用すると、ベース電流  $I_B$  は負荷電流  $I_L$  に対して図のようになります。



(図 a)



(図 b)



(図 c)

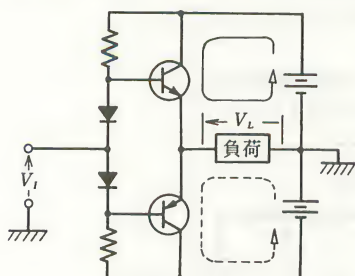
### 3. 電力制御回路の応用

(1) 図 a のように NPN トランジスタと PNP トランジスタを上下対称に組み合わせた回路では、入力電圧によって負荷に加わる電力を制御するだけでなく、負荷に流れる電流の方向をも変えることができます。

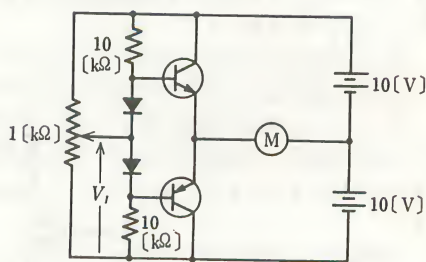
① 入力電圧 ( $V_i$ ) を正方向に増加させると、NPN トランジスタが動作して実線の電流が流れます。

② また、入力電圧を負方向に増加させると、PNP トランジスタが動作して破線の電流が流れます。

(2) 図 b の回路では、可変抵抗の位置を変化させることによって、モータの回転速度や回転方向が制御できるようになります。



(図 a)



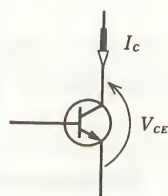
(図 b)

### 4. トランジスタにおける消費電力

(1) トランジスタには、コレクタ電流  $I_c$  とコレクタ・エミッタ間電圧  $V_{CE}$  によるつぎのような電力の消費があります。

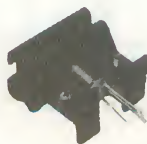
この消費電力のことをコレクタ損失  $P_c$  としています。

$$P_c = I_c \times V_{CE}$$



(2) コレクタ損失は熱となってトランジスタの温度を上昇させるため、その取り扱いには注意が必要です。

(3) トランジスタのコレクタ損失が大きくなる場合は、図のように放熱板をつけて用います。

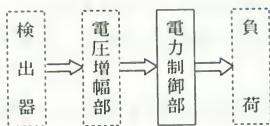




## 学習の展開

1 前章では、トランジスタを用いた電圧増幅部について学習してきました。

この章では、電圧増幅された大きな信号で負荷を制御する働きをもつ電力制御部について、学習を進めていきましょう。



「この学習が終ると、  
電子制御の基本は  
一応「終」です」

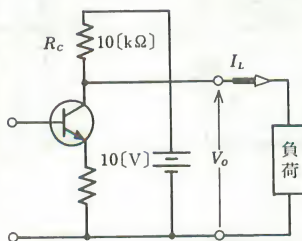
ヨシ かんばうう

2 それでは、まず最初に電力制御部がなぜ必要なのかということからしらべていきましょう。

電力制御部がなぜ必要なのかをしらべるために、電圧増幅器の出力を負荷に直接加えた場合にどのようなかをみてみましょう。

図のように、電圧増幅器の出力に負荷を接続して、負荷電流  $I_L$  を流すとどのようなのでしょうか。

負荷電流  $I_L$  は抵抗  $R_c$  を流れるわけですから、出力電圧  $V_o$  の値は、 $I_L R_c$  の電圧降下によって \_\_\_\_\_ してしまいます。



たとえば、図のように  $10[kΩ]$  の抵抗が接続されていると、負荷電流  $I_L$  が  $0.2[mA]$  程度でも、出力電圧の値は  $2[V]$  も低下してしまいます。

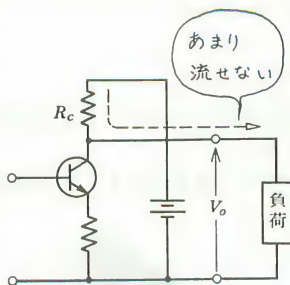
低下

フン フン  
 $0.2[mA] \times 10[kΩ] = 2V$   
 だから、 $1mA$  流れると  
 $V_o = 0V$  になって  
 しまうなー

3 すなわち、電圧増幅器の出力に負荷を直接接続して負荷電流を流すと、出力電圧が \_\_\_\_\_ し、正常な電圧増幅度が得られなくなってしまうわけです。

いいかえれば、電圧増幅器の出力からは、出力電圧に影響を与えないような小さな電流しか取り出せないことになります。

このような微小電流では、一般に負荷を駆動することはできませんから、結局、電圧増幅器の出力を負荷に直接加えることはできないことになります。



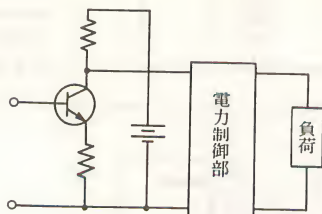
低下

フン フン  
 負荷電流 ( $I_L$ ) によって、  
 出力電圧  $V_o$  が下がって  
 しまうわけだ

「そういうこと」

4 そこで、大きな電流を必要とする負荷を駆動したい場合には、電圧増幅器と負荷との間に、図のような電力制御部を入れ、負荷を駆動するようにしています。

電力制御部とは、電圧増幅器の出力からほとんど電流を取り出さずに、そして、電圧増幅器の出力に応じて負荷を自由に駆動できるようにするためのものです。



「電力制御部の必要性が  
わかったかな」

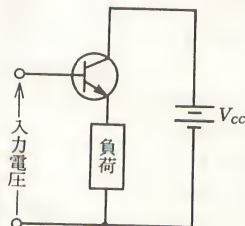
OK, OK.

5 では、電力制御部について、具体的に学習していきましょう。

図は、電力制御部の基本回路を示しています。

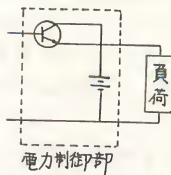
このような回路を電圧増幅器の出力に接続しておくと、電圧増幅器からの出力電圧によってうまく負荷を駆動できるようになります。

では、その理由をしらべてみましょう。



アレフ フレームと  
デフォット スタイルが  
違うぞ

「次のように書きなおすと  
どうかかな」

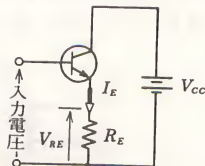


6 まず、図のようにエミッタ回路のところに抵抗  $R_E$  を接続したとき、 $R_E$  にはどのような電圧がかかり、どのような電流が流れたかを、もう一度思い出してください。

(1)  $V_{RE}$  の値は、常にベースに加えた電圧から(ア) \_\_\_\_\_  
[V]引いた値になりましたね。

(2) また、この  $V_{RE}$  を生じるための電流  $I_E$  は、 $h_{FE}$  が大きければほとんど(イ) \_\_\_\_\_  
によって構成されていました。

つまり図のような回路では、 $R_E$  にかかる電圧は入力電圧によって決まり、また  $R_E$  に流れる電流は電源  $V_{cc}$  から供給できるわけです。



(ア) 0.7

(イ)  $I_C$

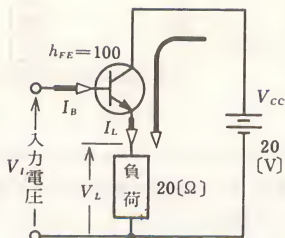
「ポイントは  
最後の5行ですヨ」



11 どのようになりましたか。

入力電圧からはほとんど電流をとらずに、入力電圧によって負荷に加える電力がうまく制御されていますね。

$V_i$	$I_B$	$V_L$	$I_L$	$P_o$
2.7[V]	1[mA]	2[V]	0.1[A]	0.2[W]
10.7[V]	5[mA]	10[V]	0.5[A]	5[W]
18.7[V]	9[mA]	18[V]	0.9[A]	16.2[W]



(この場合、 $V_{cc}$ からはほぼ負荷電流に近い大きさの電流を取り出すことになりますから、それだけの電流を流すことのできる電源が必要になります。)

でも  
数[mA]の $I_B$ が流れますよ

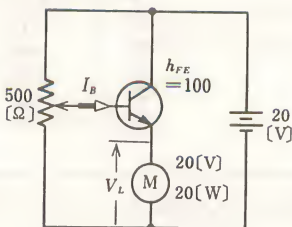
「しかし  $I_L$ よりは  
かなり少ないでしょ」

でも この電流が問題に  
なるときは どうするんですか

「なかなか  
逆走がきいしいね。  
この件については、もう  
ナレ。後で扱います」

12 図の回路は、可変抵抗を用いてモータに加わる電圧を制御し、速度をコントロールしようとするものです。

入力電流( $I_B$ )はほとんど必要としませんから、 $V_L$ の値は可変抵抗の分割比で定まります。



可変抵抗で入力電圧を  
変化させているわけですね

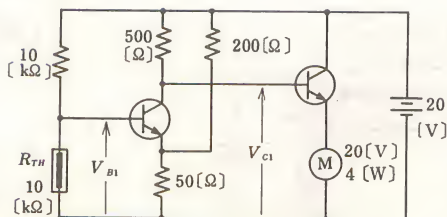
「そういうこと」

13 図の回路は、温度を検出し、電圧増幅した出力を電力制御回路に加えて、モータの速度をコントロールしようとする回路です。

温度が上昇したとき、どのようになるかを考えてください。

温度が上昇する。

↓  
 $V_{B1}$  が(ア) \_\_\_\_\_  
↓  
 $V_{C1}$  が(イ) \_\_\_\_\_  
↓  
モータの回転速度が(ウ) \_\_\_\_\_



(ア) 減少

(イ) 増加

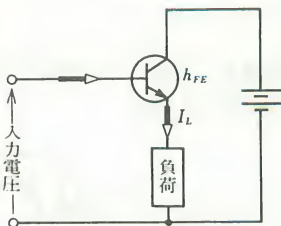
(ウ) 上昇

「このモータに ファンを  
つけておくと。  
どうかなかな」



14 ところで、図のような回路で負荷を駆動しようとしたとき、入力電圧からまったく電流を取り出さないわけではありません。

すでに学んだように、コレクタ電流  $I_C$  の  $\frac{1}{h_{FE}}$  の電流は必要とするわけです。



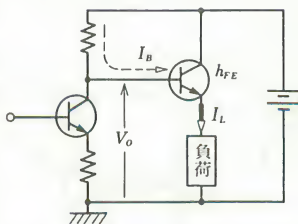
「今から F11 の質問に答えますよ」

ハイ、ハイ 待ってました

15 この電流  $I_B$  によって電圧  $V_O$  が影響を受けなければ問題はありますが、もしも  $V_O$  がかなり減少してしまうようならば、もっと少ない電流値におさえる必要があります。

$I_B$  の値は  $\frac{I_C}{h_{FE}} \div \frac{I_L}{h_{FE}}$  となりま

すから、 $I_B$  の値をさらに小さくするためには、トランジスタの  $h_{FE}$  を \_\_\_\_\_ くすればよいわけです。

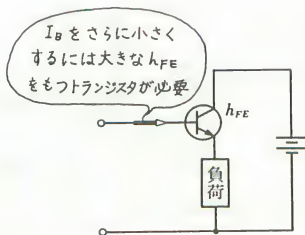


大きいでも  $h_{FE}$  には限界があるでしょ

「ネウですオー」

16 すなわち、電力制御回路への入力電流をさらに小さくするためには、さらに大きな \_\_\_\_\_ の値をもつトランジスタが必要になってきます。

しかし、使用するトランジスタによっては、どうしても必要な  $h_{FE}$  が得られないこともあります。



$h_{FE}$

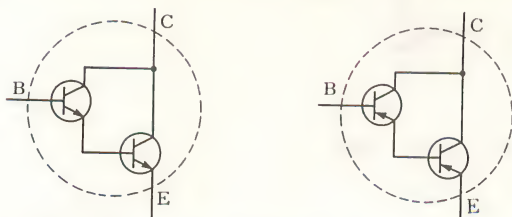
フシ、フレ

「次のフレームへどうぞ」



17 このような場合は、図のようにトランジスタを2段接続して、見かけ上、 $h_{FE}$  のかなり大きな一つのトランジスタとして動作させるようにしています。

このようなトランジスタの接続法をダーリントン接続といいます。



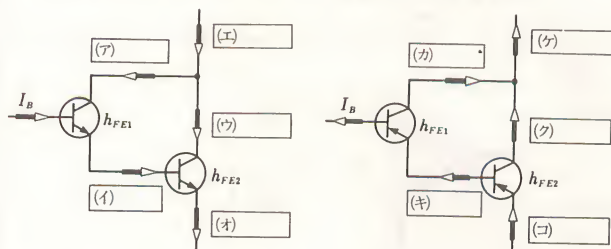
(図 a) NPN トランジスタの場合 (図 b) PNP トランジスタの場合

トランジスタを  
2段接続ねー

「そうですよ  
ダーリントン接続です」

18 それでは、図のようなダーリントン接続における各部の電流がどのような値になるかを示してください。

〈ヒント〉(ア), (イ), (ウ), (エ), (オ)の順に求めると簡単です。



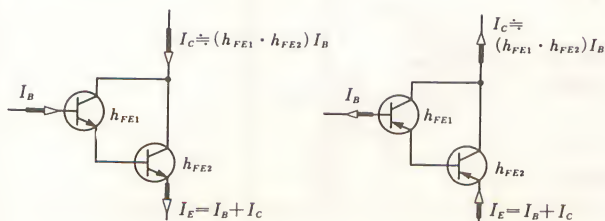
(図 a) NPN トランジスタの場合 (図 b) PNP トランジスタの場合

「あわてないで  
順を追ってネ」

$$\begin{aligned}
 & \text{(ア)} (カ) h_{FE1} \cdot I_B \\
 & \text{(イ)} (キ) (1 + h_{FE1}) I_B \\
 & \text{(ウ)} (ク) (1 + h_{FE1}) I_B \cdot h_{FE2} \\
 & \text{(エ)} (ケ) h_{FE1} I_B + (1 + h_{FE1}) h_{FE2} I_B \\
 & \quad = (h_{FE1} + (1 + h_{FE1}) h_{FE2}) I_B \\
 & \text{(オ)} (コ) \\
 & \quad (1 + h_{FE1}) I_B h_{FE2} + (1 + h_{FE1}) I_B \\
 & \quad = \{(1 + h_{FE1}) h_{FE2} + (1 + h_{FE1})\} I_B \\
 & \quad = (1 + h_{FE1}) (1 + h_{FE2}) I_B
 \end{aligned}$$

19 どのようになりましたか。

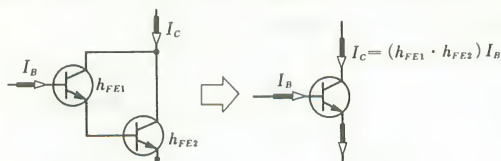
前フレームでは厳密に計算しましたが、これらを  $(1 + h_{FE}) \doteq h_{FE}$  として近似するとつぎようになります。



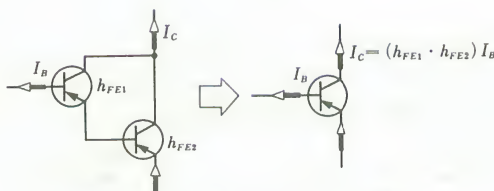
(図 a) NPN トランジスタの場合 (図 b) PNP トランジスタの場合

スゴく  
すっきり すげー

20 すなわち、トランジスタをダーリントン接続すると、 $I_B$ 、 $I_C$ の値はそれぞれ図のようになり、実質的に\_\_\_\_\_の電流増幅率をもつ一つのトランジスタとして動作するようになるわけです。



(図a) NPNトランジスタの場合



(図b) PNPトランジスタの場合

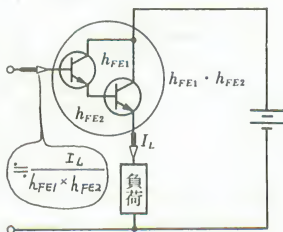
$$h_{FE1} \times h_{FE2}$$

フン フン

これは おもしろい

「このように 内部的に接続されたものが、ダーリントントランジスタとして、市販されていますよ」

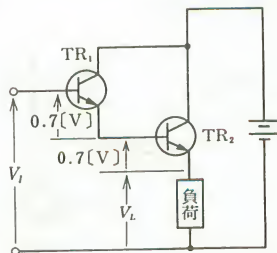
21 このようなダーリントン接続を利用すると、実質的には非常に大きな  $h_{FE}$  の値をもったトランジスタが得られることになり、たとえば大きな負荷電流が流れる場合でも、入力電流を非常に小さな値にすることができるため、問題のない電力制御回路がつくれることになります。



ナルホド  
ナルホド

22 ただし、この場合、注意しなければならないことがあります。

それは、負荷にかかる電圧  $V_L$  が、図でわかるように、入力電圧  $V_i$  から  $TR_1$  の  $V_{BE}$  (0.7[V]) と、 $TR_2$  の  $V_{BE}$  (0.7[V]) とをさし引いた値になりますから、入力電圧に対して約\_\_\_\_\_[V]だけ低くなるということです。



1.4

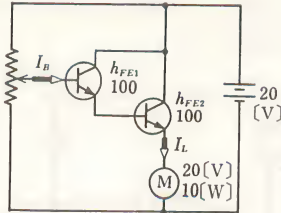
フン フン

「気を付けて下さいヨ」

23 さて、図の回路は、可変抵抗を用いて電力制御回路にかかる入力電圧を調整し、モータの速度を制御しようとする回路です。

入力電圧が表のような値になったときのモータに加わる電圧  $V_L$ 、モータに流れる電流  $I_L$ 、モータの消費電力  $P_0$ 、および入力電流  $I_B$  をそれぞれ求めてみてください(モータの抵抗は  $40[\Omega]$  とします)。

入力電圧	$I_B$ [mA]	$V_L$ [V]	$I_L$ [A]	$P_0$ [W]
1.4[V]				
11.4[V]				
19.4[V]				



入力電圧	$I_B$ [mA]	$V_L$ [V]	$I_L$ [A]	$P_0$ [W]
1.4[V]	0	0	0	0
11.4[V]	0.025	10	0.25	2.5
19.4[V]	0.045	18	0.45	8.1

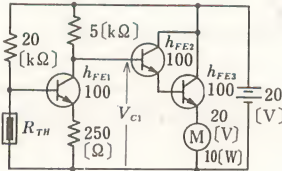
24 図の回路は、サーミスタで温度変化を検出した信号を電圧増幅し、その電圧でモータに与える電力を制御する回路です。

いままでのまとめの意味で、温度によってサーミスタの抵抗がつつぎのように変化したとき、モータに加わる電圧  $V_L$  を求めてください。

$$R_{TH} = 1.7[k\Omega] \text{ のとき } \Rightarrow V_{C1} \doteq (\text{ア}) \text{ [V]} \Rightarrow V_L \doteq (\text{イ}) \text{ [V]}$$

$$R_{TH} = 1.2[k\Omega] \text{ のとき } \Rightarrow V_{C1} \doteq (\text{ウ}) \text{ [V]} \Rightarrow V_L \doteq (\text{エ}) \text{ [V]}$$

$$R_{TH} = 800[\Omega] \text{ のとき } \Rightarrow V_{C1} \doteq (\text{オ}) \text{ [V]} \Rightarrow V_L \doteq (\text{カ}) \text{ [V]}$$



「電力制御回路への  
入力電流は、無視できる  
ような値に なる  
いますよ」

(ア)	2.7	(イ)	1.3
(ウ)	11.4	(エ)	10
(オ)	18.6	(カ)	17.2

25 これでいちおう、電力制御の基本の学習は終わりました。

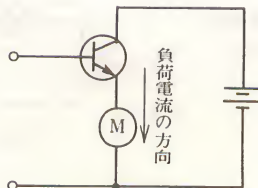
ところで、いままでの制御方法は、負荷に流れる電流が常に一方方向の制御でした。

したがって、モータの回転速度を制御することはできましたが、回転方向を変えることはできません。

しかし、実際には、入力電圧の大きさによってモータの回転方向を正方向や逆方向に切り換えたいような場合もあります。

このようなときには、モータに流れる電流の方向も変えなければなりません。

では次に、いままでの学習を基礎にして、このように回転方向も制御できる方法について学習していきましょう。



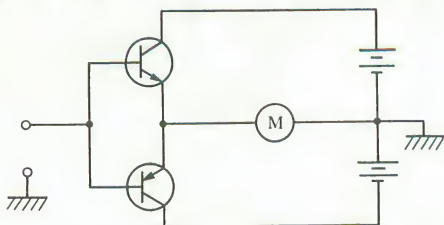
ホー  
こんなことも  
できるのですか

「制御力の問題だよ」

26 このような場合も、電力制御回路の構成そのものはまったく変わりません。

このような場合の基本的な考え方は、図のようにいままでとまったく逆の回路を下側につければよいということです。

トランジスタについても同様に、NPNとはまったく逆の動作をするPNPトランジスタを使用します。

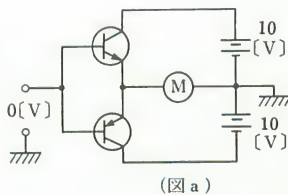


このようにすると  
どうなるのかな

「次のフレームへ  
どうぞ」

27 ではまず、この回路の入力電圧を0[V]にしたときの動作をみてみましょう。

わかりやすくするために、図aの回路を上下分割して、図bや図cのようにして考えていきましょう。



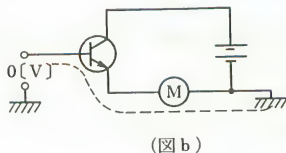
(図 a)

図でわかるように、入力電圧が0[V]の場合は、どちらのトランジスタにもベース電流が

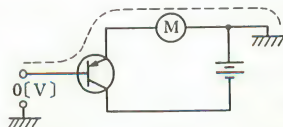
{ (ア) 流れます。 }

{ (イ) 流れません。 }

したがって、モータにも電流が流れず、モータは回転しません。



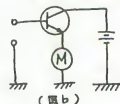
(図 b)



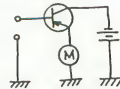
(図 c)

分割すると  
変な感じだなあ

「次のように  
書き直すとどうかな」



(図 b)



(図 c)

(イ) 流れません

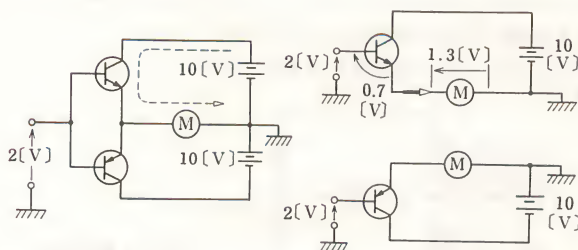


28 それでは、入力電圧として2[V]を加えたときにはどのようになるでしょうか。

この場合には、PNPトランジスタは極性が逆方向のためベース電流は流れませんが、NPNトランジスタのほうには順方向電圧が加わりますから、ベース・エミッタ間の電圧降下0.7[V]を引いた(ア) [V]の電圧がモータに加わります。

したがって、モータには矢印の方向の電流が流れ、回転します。

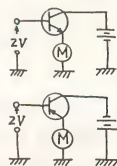
そして、この入力電圧が上昇すればするほど、モータに加わる電圧は大きくなり { (イ)速く } 回転するようになります。



(ア) 1.3

(イ) 速く

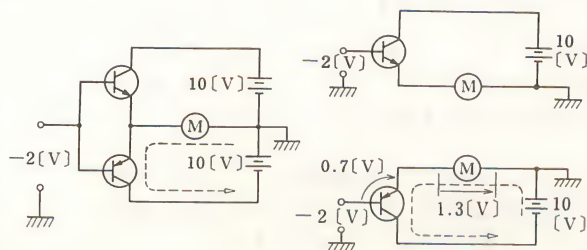
わかりにくければ、  
次のようにして  
考えれば いいよ



29 では、入力電圧が-2[V]になったときを考えてみましょう。

こんどは上側のNPNトランジスタが動作しなくなり、下側のPNPトランジスタが動作するようになりますから、モータにはさきほどとは逆の方向に(ア) [V]の電圧がかかるようになります。

したがって、モータは逆方向に回転し、そして、この場合も入力電圧が-2[V]から負方向に大きくなればなるほど、モータは { (イ)速く } 回転します。



(ア) 1.3

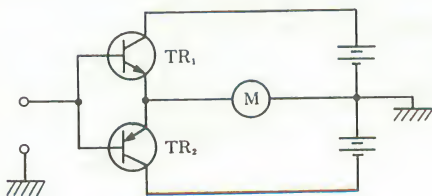
(イ) 速く

なるほど  
入力電圧によって、  
それぞれのトランジスタを  
切り替えて、使用する  
わけだね

「ネウイクこと」



30 このような回路は、モータの正方向・逆方向の回転を制御する場合などによく用いられる回路ですから、基本の動作をしっかりと理解しておいてください。



「入力電圧によって  
どのようにするか  
確認しておいて下さいヨ」

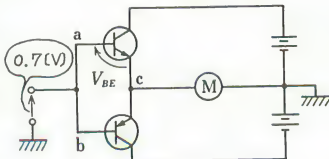
ハイ、ハイ、

31 ところで、いまの場合は入力電圧が $+0.7$  [V] から $-0.7$  [V] の範囲内ではベース電流が流れないため、モータは停止したままです。

たとえば図のように $+0.7$  [V]を加えたときを考えてみましょう。

この場合は、図の  $V_{BE}$  で  $0.7$  [V] の電圧降下を起こしますから、点cの電位は $0$  [V] となって、モータに電圧はかかりません。

つまり、入力電圧が $\pm 0.7$  [V] の範囲ではモータはまったく動作しません。



$V_{BE}$ での電圧降下が  
問題なんだナ

「夏の入力電圧の場合も  
同じことですよ」

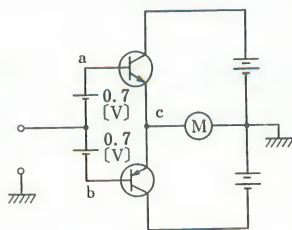
32 では、図のように $0.7$  [V] の電池を入れるとどうでしょうか。

こうしておくと、入力電圧がすこしでも上昇すると点aの電位も点cの電位も上昇します。

たとえば、入力電圧が $0.2$  [V] のとき点aの電位は(ア) [V]となり、また点cの電位は(イ) [V]となります。

つまり、入力電圧が $0$  [V]からすこしでも上昇すると、すぐにモータは回転します。

また、入力電圧が $-0.2$  [V]になった場合は、点bの電位が(ウ) [V]となり、また点cの電位が(エ) [V] となって、モータには逆方向の $0.2$  [V] の電圧が加わるようになります。



ナルホド  
B・E間電圧の $0.7$  [V]を  
補償するわけだ、

「やういふこと」

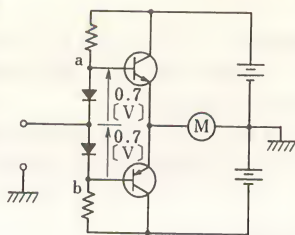
(ア)  $0.9$

(イ)  $0.2$

(ウ)  $-0.9$

(エ)  $-0.2$

33 ところで、実際にはこのよう  
なところに電池を入れるのは不便  
ですから、図のように抵抗とダイ  
オードを接続して、ダイオードの  
ところで常に0.7[V]の電圧降下  
を起こさせて、この動作をさせて  
います。

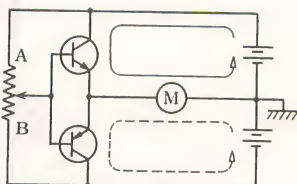


「ダイオードも、トランジスタ  
のB・E間と同じように、  
順方向電流を流すと、  
0.7[V]の電圧降下を  
起こします」

34 図は、入力電圧を可変抵抗で変化させ、それによってモータを  
コントロールしようとする回路です。

可変抵抗が中点にあるときはモ  
ータは停止しています。

次に、A方向に移動させるとモ  
ータには { (ア)実線 } の方向に電流  
が流れ、またB方向に移動させる  
とモータには { (イ)実線 } の方向に  
電流が流れるようになります。



(ア) 実線

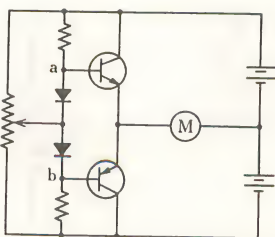
(イ) 破線

OK OK  
し、し、±0.7Vはダメな  
わけでは

「そういうこと」

35 また、図の回路はモータが動  
作しない範囲をせまくした制御回  
路です。

この場合も可変抵抗を変化させ  
て点aや点bの電位を変化させ、  
モータに加わる電圧を制御してい  
ます。



OK, OK,

36 いままでの学習で、電圧増幅器出力で負荷を制御するとどのよ  
うな問題が生じるか、またそのためにどのような電力制御回路を構  
成すればよいのかといったことを学んできました。

では最後に、この電力制御回路を実際に動作させる場合に注意し  
なければならない点について学習しておきましょう。

それは、トランジスタにおける消費電力の問題です。

37

## トランジスタにおける消費電力

トランジスタにおける消費電力については、これまで特に触れませんでしたでしたが、トランジスタにも抵抗と同じように電力の消費が起こり、この消費電力が熱の発生となります。

温度がいくら上昇しても、それに耐えられるものであれば問題はないのですが、トランジスタなどの半導体素子は特に熱に弱いという欠点があります。

したがって、この熱発生の原因となる \_\_\_\_\_ については、じゅうぶん注意を払う必要があります。

ジュール熱ですね

「第1章で少しでてたよ」

消費電力

38 トランジスタにおける消費電力には、つぎの二つのものがあります。

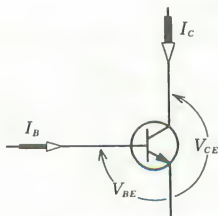
(1) ベース電流  $I_B$  と  $V_{BE}$  による

消費電力  $P_B$

$$P_B = V_{BE} \times I_B$$

(2) コレクタ電流  $I_C$  と  $V_{CE}$  による消費電力  $P_C$

$$P_C = V_{CE} \times I_C$$



フン フン

電力 = 電圧 × 電流 だからなァ

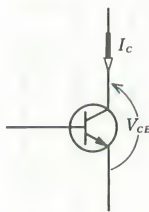
「この電力が 熱のもとになるんだよ」

39 しかし、 $P_B$  は  $P_C$  に比べると非常に小さく、問題にならないため、一般には  $P_C$  をトランジスタにおける消費電力として取り扱っています。

そして、この  $P_C$  のことを一般にコレクタにおける電力損失という意味からコレクタ損失といいます。

$$(P_C = V_{CE} \times I_C) \gg (P_B = V_{BE} \times I_B)$$

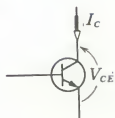
非常に大きい

「なぜ  $P_C \gg P_B$  なのかわかるかな」 $I_C \gg I_B$  だからでしょ

「トランジスタがわかってきたね」

40 このようにトランジスタには、コレクタ損失  $P_C = V_{CE} \times I_C$  の消費電力があり、この電力がすべて熱となるのです。

当然のことですが、このコレクタ損失が大きくなればなるほど、発生する熱量も大きくなり、トランジスタの温度は \_\_\_\_\_ していきます。



$P_C = V_{CE} \times I_C$  が大きいほどトランジスタでの発生熱量も増加する。

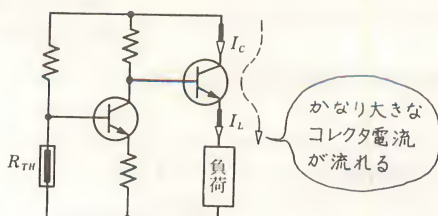
上昇

当然、当然、

41 電圧増幅回路のトランジスタの場合には、コレクタ電流が一般に小さく、ミリ・アンペア程度なので、コレクタ損失  $P_c = V_{ce} \times I_c$  も小さく、心配はありません。

しかし、電力制御部のトランジスタにはかなり大きなコレクタ電流を流すため、コレクタ損失 ( $P_c$ ) の値も相当大きくなってしまいます。

ですから、電力制御部のトランジスタについては、とくにこの \_\_\_\_\_ に注意しなければなりません。



コレクタ損失

フン フン  
電力制御部のトランジスタ  
には、負荷電流が  
流れるんだからなあ

42 では実際に、図のような電力制御部のトランジスタにおけるコレクタ損失がどのようになるか求めてみましょう。

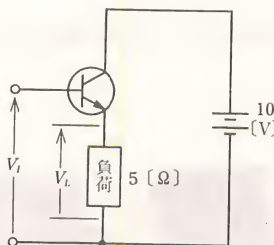
たとえば、入力電圧  $V_i$  が  $5.7[V]$  とすると、負荷に加わる電圧  $V_L$  が  $5[V]$  になりますから、エミッタに流れる電流は(ア) \_\_\_\_\_ [A] となり、コレクタにもおよそ  $1[A]$  の電流が流れることとなります。

したがって、コレクタ損失  $P_c$  はつぎのように求められます。

$$P_c = V_{ce} \times I_c$$

$$= (V_{cc} - \text{(イ)}) I_c$$

$$= \text{(ウ)} \text{ [W]}$$



(イ)  $V_L$

(ウ) 5

できましたか。

それでは、これと同じ方法で入力電圧  $V_i$  が  $2.7[V]$  のときと、 $8.7[V]$  のときのコレクタ損失をそれぞれ求めてください。

(1)  $V_i = 2.7[V]$  のとき  $P_c = \text{(エ)} \text{ [W]}$

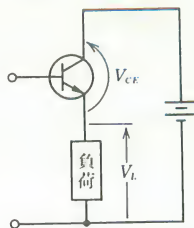
(エ) 3.2

(2)  $V_i = 8.7[V]$  のとき  $P_c = \text{(オ)} \text{ [W]}$

(オ) 3.2



43 トランジスタにおけるコレクタ損失は、入力電圧の値によって異なりますが、実は負荷にかかる電圧  $V_L$  とコレクタ・エミッタ間の電圧  $V_{CE}$  の値が等しくなったときが最大の値となります。



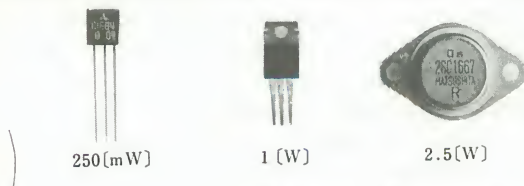
そのため、この最大の消費電力を発生する状態における熱発生に対して、トランジスタが耐えられるようにしなければなりません。

たとえば、前フレームの回路の場合には、5 [W]の消費電力に耐える必要があるわけです。

「つまり、5[W]の消費電力によって、生じる熱発生に耐える必要があるということですよ」

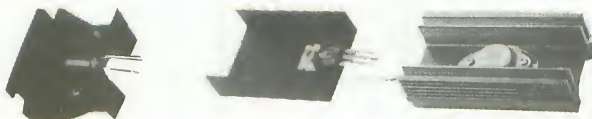
わかりました。

44 ところで、トランジスタ単体の許容消費電力は、トランジスタによっても異なりますが、およそつぎのように非常に小さな値です。



トランジスタにこれ以上の消費電力がある場合には、熱を放散させるための放熱板を取りつけて放熱効果をよくし、これに対処しています。

図は、トランジスタに放熱板をつけ、許容消費電力を向上させた例を示しています。



ナルホド  
トランジスタに変わるものが  
ついてるのは、  
放熱のためののか

45 それでは、このようにトランジスタで大きな消費電力を発生させないで負荷を制御する方法はないのでしょうか。

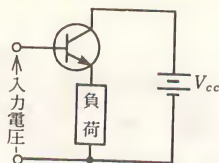
次章では、このような方法について学習することにししょう。

「どうせ  
おたのしみに」



# 進んだ学習：電圧安定化回路

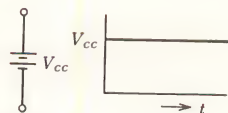
1 いままでの学習では、図のような回路を構成し、入力電圧によって負荷に加える電力を制御する方法について学習してきました。



「回路動作はもう、バッチリですネ」

ハイ 大丈夫ですよ

2 ところで、この回路の応用として、負荷の制御という意味からは、すこしずれるのですが、電子制御を行ううえで非常に重要な働きをする電圧安定化回路があります。



電圧安定化回路とは、電子回路の直流電源  $V_{cc}$  をつくるときに必要なものなのです。

フーン  
これから 直流電源を  
つくろうってわけかな

「実はそうなんです」

3 一般に直流電源  $V_{cc}$  は、図のように交流100[V] の電源電圧を変圧器で変圧し、その出力電圧をダイオードで整流したのち、コンデンサで平滑して得ているわけです。

ここで整流とは、図のようにダイオードを用いて、交流電圧の正負の電圧から正か負かの半波分だけを取り出すことをいいます。

また、平滑とは、変動している電圧をコンデンサを用いてなめらかにすることをいいます。



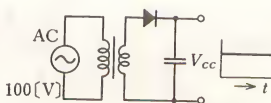
なるほど  
このようなステップを  
ふんで 直流電源を  
つくっているわけか

「そうですヨ  
電池の代用を  
させているわけです」

4 つまり、図のような回路で直流電圧を得ているわけです。

このようにして交流電圧から直流電圧をつくることを整流といい、そのための回路を電源整流回路といっています。

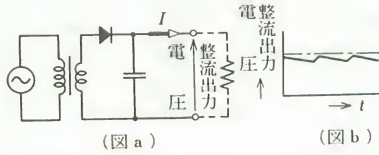
そして、このようにして得た直流電圧のことを整流出力電圧といっています。



「整流回路については  
電子回路編(1)で、  
取扱っていますから、  
必要なら参照して下さい」

5 しかし、このような電源整流回路だけではすこしふつごうな場合があります。

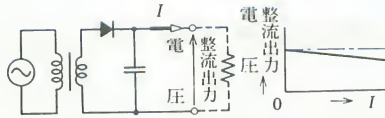
ここでは説明を省きますが、このような電源整流回路だけの場合には、直流電圧が出るといっても、電流( $I$ )を取り出すと、図bのように整流出力電圧が変動するようになります。



オヤ オヤ  
電圧が変動するんですか

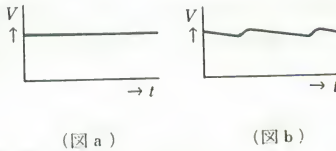
「このような現象を  
リップル (ripple) が  
でると言っていますヨ」

6 さらに、電流の大きさによって図のように整流出力電圧が低下するようになります。



「この現象を電圧変動とい  
い、この程度低下  
するかという目安と  
電圧変動率 という値で  
示しています」

7 すなわち、交流電圧を整流し、平滑しただけでは、図aのようなよい直流電圧は得られず、図bのように変動したり、低下したりしてしまうわけです。

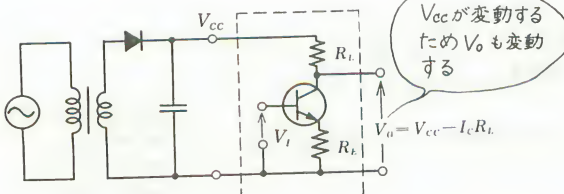


ウーム  
完全な直流電圧が  
得られないという  
ことですね

「そういうこと」

8 では、このような整流出力電圧を、たとえば図のような電圧増幅回路の直流電源  $V_{cc}$  として用いるとどうでしょう。

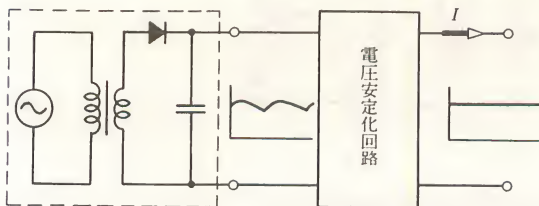
$V_{cc}$  が変動すると、増幅回路の出力電圧  $V_o$  も同じように変動してしまいます。



フン フン

$V_{cc}$  に変動しちや  
ななかなないなあ

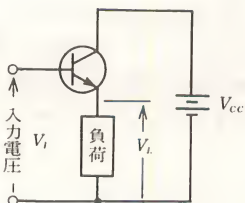
9 そこで、このような場合に、電流を流しても安定した直流電圧が得られるようにするための回路を電圧安定化回路といっているわけです。



ホー  
電圧安定化回路を通せば  
完全な直流電圧になると  
いうわけですね。

「ヤチとあり  
変動しないように  
安定化 するわけ  
ですからね」

10 それでは、いままで学習してきた電力制御回路がどのようにして電圧安定化回路の働きをするようになるのかを学習していきましょう。



「さあ  
ここからが本論だよ」

ヨーシ

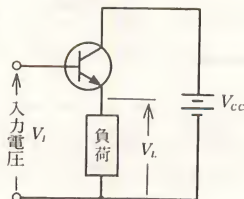
11 すでに学んだように、図のような電力制御回路では、負荷に加わる電圧  $V_L$  は

$$V_L = V_i - 0.7[V]$$

となり、入力電圧  $V_i$  の値によって定まりました。

コレクタに接続されている直流電源  $V_{cc}$  が、ほぼ負荷に加える電圧以上の電圧値をもったものであれば、たとえその値が変動しても  $V_L$  が変化することはありません。

$V_L$  は  $V_i$  によって定まります。

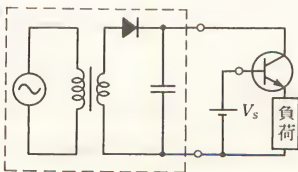


「これは復習ですよ  
大丈夫かな」

OK  
バッテリー

12 では、この直流電源のかわりに、図のように整流出力電圧を加えておくとどうでしょう。

ベースには、電流はそれほどとれませんが、安定した直流電圧  $V_s$  を加えておきます。



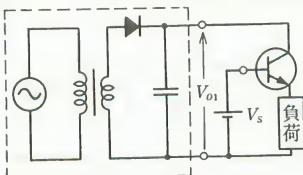
「負荷に加わる電圧は  
どうなるかな」

$$V_s - 0.7[V] \text{ 程度}$$

「ホー  
スゴイネ」

13 このようにすると、負荷に加わる電圧は、たとえ整流出力電圧  $V_{o1}$  が変動しても、正確に  $V_s - 0.7$  [V] となります。

そして、たとえ負荷が変わって負荷電流が変化しても、負荷に加わる電圧が変動することはなくなります。



フン フン

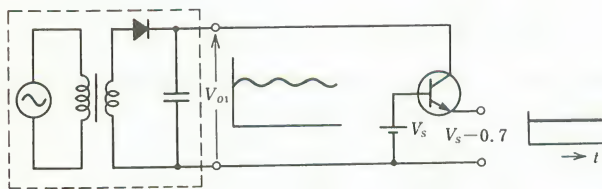
OK OK

「でも  
手を振っちゃ アメジョ  
ここが ポイントです」

14 では、負荷の両端から図のように直流出力電圧を取るようにするとどうでしょう。

このようにすれば、 $V_s$  の値さえ安定していれば、エミッタ・アース間には安定した直流出力電圧が得られるようになります。

つまり、電源整流回路の出力を図のように  $V_s$  を接続した電力制御回路を介して取り出すと、電力制御回路は電圧安定化回路として動作し、安定した直流電圧が得られるようになるわけです。



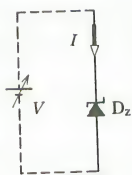
なるほど  
これは面白い回路だ

でも  $V_s$  は  
どうして 決まるかな

「次のフレームへ、どうぞ」

15 ところで、安定した  $V_s$  の電圧は、電流をあまり取り出さないのであれば、ツェナ・ダイオードを用いて簡単につくることができます。

ツェナ・ダイオード ( $D_z$ ) とはダイオードの一種で、図 a のように逆方向に電圧 ( $V$ ) を加え、この電圧を上昇していったとき、図 b のようにある電圧値に達すると急激に電流 ( $I$ ) を流し始めるというものです。



(図 a)



(図 b)

ここで、電流を流し始める電圧のことをツェナ電圧 ( $V_z$ ) といっていますが、ツェナ・ダイオードにはいろいろな値のツェナ電圧のものがあります。

アレ アレ  
ダイオードは 逆方向に  
電流は流さないはず  
だったのになあ

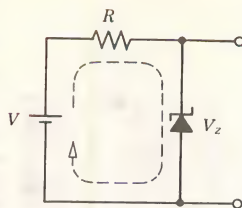
「チョット 違っから  
ツェナ——と名前が  
ついているのだから」



16 このようなツェナ・ダイオードを用いて図のような回路を構成し、電圧  $V$  をツェナ電圧  $V_Z$  以上の値にしておくと、 $V_Z$  以上の電圧分は図のように電流が流れることによって、すべて抵抗  $R$  での電圧降下となってしまいます。

そして、ツェナ・ダイオードの両端には、一定のツェナ電圧  $V_Z$  が得られるようになります。

たとえば、図の回路で  $V_Z = 5\text{[V]}$  のツェナ・ダイオードを接続し、電圧  $V$  に  $10\text{[V]}$  を加えると、抵抗  $R$  で  $5\text{[V]}$  の電圧降下を生じ、ツェナ・ダイオードの両端からは  $5\text{[V]}$  の電圧が得られます。



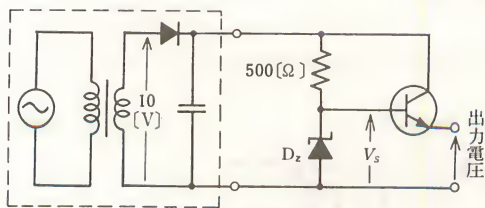
「このようなことから  
ツェナ・ダイオードのことを  
定電圧ダイオード  
ともいっています」

アルノート  
・定電圧のダイオードと  
いう意味だね

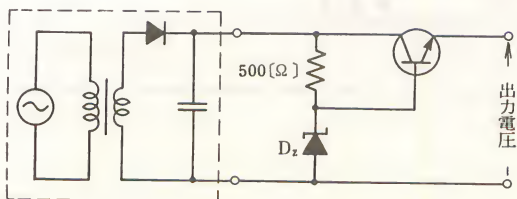
17 図 a の回路は、ツェナ・ダイオード  $D_Z$  を用いて安定した  $V_S$  の電圧をつくり、これによって安定した直流電圧を得ようとした電圧安定化回路です。

図 a の回路では  $5\text{[V]}$  のツェナ・ダイオードを接続していますから、 $V_S = 5\text{[V]}$  となり、出力には安定した \_\_\_\_\_  $\text{[V]}$  の直流電圧が得られるようになります。

一般には図 a のような書き方をせず、図 b のような書き方をしています。



(図 a)



(図 b)

4.3

「図 a と図 b とは  
同じものですヨ」

書き方によって 感じが  
変わるもんだなあ

「外見に  
まじわされないようにね」



18 図の回路は、直流出力電圧を自由に变化できるようなした電圧安定化回路です。

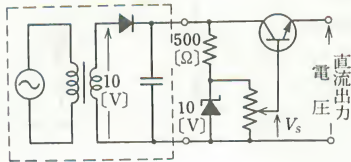
ツェナ・ダイオードで得た安定した電圧を可変抵抗で分圧し、 $V_s$  の値を変化できるようにしています。

$V_s$  の値をつぎのようにしたときの直流出力電圧はいくらになるでしょうか。

$V_s = 3 \text{ [V]}$  のとき  $\Rightarrow$  (ア) \_\_\_\_\_ [V]

$V_s = 5 \text{ [V]}$  のとき  $\Rightarrow$  (イ) \_\_\_\_\_ [V]

$V_s = 8 \text{ [V]}$  のとき  $\Rightarrow$  (ウ) \_\_\_\_\_ [V]



なるほど  
すると可変型安定電源だ

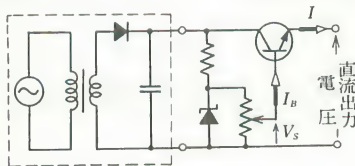
「変つてみる気は  
なるかな」

(ア) 2.3

(イ) 4.3

(ウ) 7.3

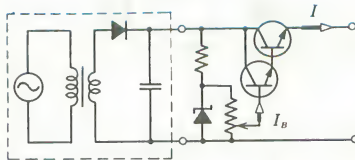
19 しかし、図のような回路では、出力電流をあまり大きくとりすぎると  $I_B$  によって可変抵抗のところで電圧降下が起こり、 $V_s$  の値が変動して直流出力電圧が変動するようになります。



$I_B$  をもっと小さくする  
必要があるのだ

「どんな回路に  
すればいいかな」

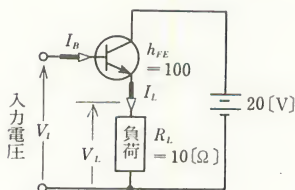
20 図の回路は、トランジスタをダーリントン接続して実質的な  $h_{FE}$  の値を大きくし、 $I_B$  の値を小さくして、かなり大きな電流を取り出しても正確に動作するようにした電圧安定化回路です。



なるほど  
一つ、作っておこうかな

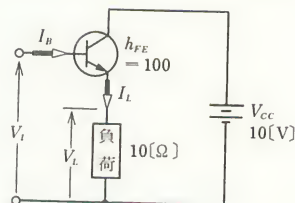
## 練習問題

- 1 図の回路で、入力電圧が $10.7[\text{V}]$ のときの  $V_L$ ,  $I_L$ ,  $I_B$  および負荷の消費電力  $P_L$  を求めなさい。



- 2 図の回路で、入力電圧をつぎのように変化したときの  $I_B$ ,  $V_L$ ,  $I_L$  および負荷の消費電力  $P_L$  の値をそれぞれ求めなさい。

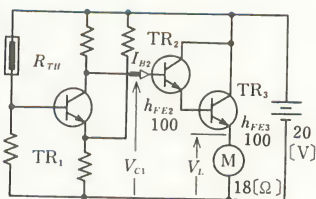
$V_i$	$I_B$	$V_L$	$I_L$	$P_L$
1.2 [V]				
5.7 [V]				
9.7 [V]				



- 3 図の回路は、サーミスタで温度を検出した信号を電圧増幅し、その出力でモータに加える電力を制御する回路です。

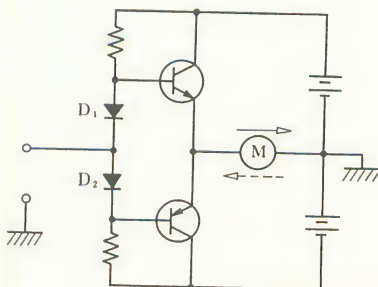
つぎの問いに答えなさい。

- (1)  $TR_2$ ,  $TR_3$  の接続法をなんといいますか。
- (2)  $TR_2$ ,  $TR_3$  の全体の電流増幅率はおおよそいくらになりますか。
- (3) 図の回路で  $V_{C1} = 19.4[\text{V}]$  のとき,  $V_L$  の値および  $I_{B2}$  の値は, おおよそいくらになりますか。



- 4 図の回路について、つぎの問いに答えなさい。

- (1) 入力電圧が正のときには、モータに流れる電流の方向は図の実線、破線のどちらの方向ですか。
- (2) 入力電圧が $+1[\text{V}]$ のときモータに加わる電圧はいくらになりますか。
- (3) ダイオード  $D_1$ ,  $D_2$  を短絡させると、どのような動作をするようになりますか。





## 5. ON-OFF制御とシュミット・トリガ

### 学習の目標

1. ON-OFF制御とはどのような制御方法なのかを学習する。
2. ON-OFF制御の基本となるトランジスタのスイッチング動作について学習する。
3. ON-OFF制御を行うために必要となる比較回路やシュミット・トリガ回路について学習する。
  - (1) どのような動作をするものか。
  - (2) どのような回路構成になっているのか。
  - (3) 各回路定数をどのように設定すればよいのか。



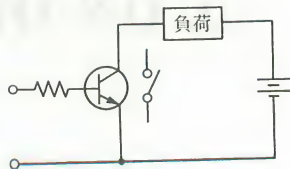
## 学習の概要

### 1. ON-OFF 制御

- (1) トランジスタにスイッチのような働きをさせて、負荷を駆動したり、しなかったりする制御をON-OFF制御といっています。

トランジスタがスイッチON⇒負荷が駆動される。

トランジスタがスイッチOFF⇒負荷が駆動されない。

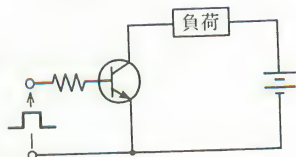


- (2) このような制御法は、トランジスタの消費電力が少なく、大きな放熱板をつけたりせずに、かなりの負荷を制御することができます。

### 2. トランジスタのスイッチング動作

図のような回路で、コレクタ電流を流さないような入力電圧か、またはコレクタ電流を飽和させるような入力電圧かの、いずれかを入力電圧を加えると、トランジスタのコレクタ・エミッタ間はスイッチと同じ動作をするようになります。

トランジスタのこのような動作をスイッチング動作といっています。



### 3. 比較回路

- (1) 比較回路とは、図のようにある値以上の入力電圧があれば出力電圧を高い値にし、ある値以下の入力電圧に対しては出力電圧を低い値にするという比較判定動作をする回路です。

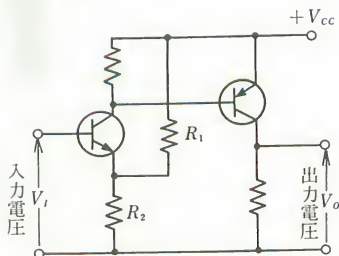
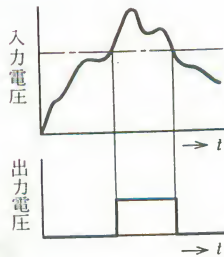
- (2) 検出器や電圧増幅器からの連続的な信号に対して、負荷をON-OFF制御するには、このような比較回路が必要になります。

- (3) 図の回路は、つぎのような比較判定動作をします。

$$V_i > \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{cc} + 0.7 \right) \text{ のとき } \Rightarrow V_o \doteq V_{cc}$$

$$V_i < \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{cc} + 0.7 \right) \text{ のとき } \Rightarrow V_o \doteq 0$$

- (4) しかし、このような回路では、入力電圧が比較判定レベル付近にあるときには、中間の出力を出すようになります。



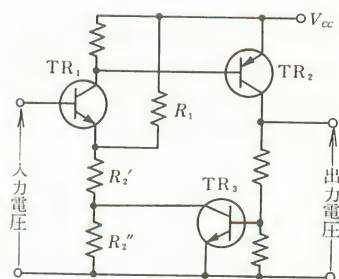
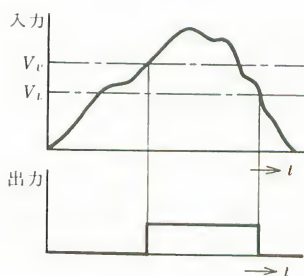


#### 4. シュミット・トリガ回路

- (1) 入力電圧が判定レベル上にあっても、中間の出力を出すことのない比較回路をシュミット・トリガ回路といっています。
- (2) シュミット・トリガ回路では、図のように出力電圧を高い値にする入力電圧の値 ( $V_H$ ) と、出力電圧を低い値にする入力電圧の値 ( $V_L$ ) とが別々に現れます。  
これがシュミット・トリガ回路の特徴です。
- (3) 図の回路の  $V_H$ ,  $V_L$  の値は、次式のようになります。

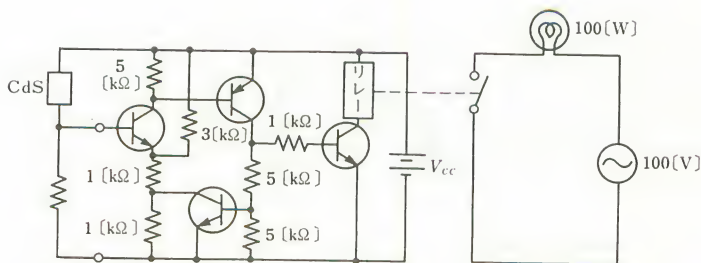
$$V_H = \frac{(R_2' + R_2'')}{R_1 + (R_2' + R_2'')} V_{CC} + 0.7$$

$$V_L = \frac{R_2'}{R_1 + R_2'} V_{CC} + 0.7$$



#### 5. 応 用 例

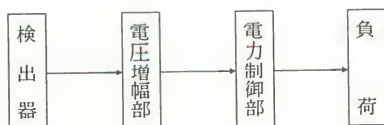
図の回路は CdS で明るさを検知し、その検出電圧が 4.7[V] 以上になるとリレーを働かせてランプを点灯し、3.2[V] 以下になるとランプを消灯するという回路です。



## 学習の展開

1 これまでの学習で、トランジスタを用いて、検出してきた信号を増幅し、負荷を制御するという電子制御の基本について学んできました。

それと同時に、トランジスタの働きや使い方についても理解できたと思います。



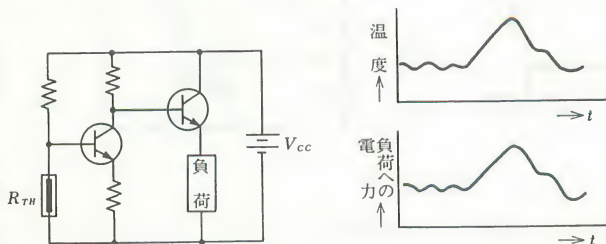
さあ スタートだ！

「この章で 第一段階の学習は 終了です。」

ヨーレ 頑張ろう

2 ところで、いままで考えてきた電力制御法は、検出してきた信号に応じて連続的に負荷に加わる電力を制御するという方法でした。

このような方法は、検出電圧に応じて非常になめらかに負荷が制御できるという特徴があります。

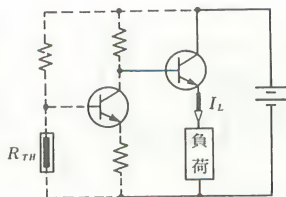


フン フン

温度によって、負荷に加わる電力を、連続的に制御できるかなあ

3 しかし、その反面、トランジスタにおける消費電力の問題がありました。

たとえば、図のような回路で負荷に加わる電力を制御する場合、消費電力の大きな負荷であれば、流れる負荷電流  $I_L$  も大きくなり、トランジスタにおける消費電力も大きくなります。



トランジスタでの消費電力は熱の発生となりますから、それにとまって放熱板も大きなものが必要になってきます。

半導体は 熱に弱いからね

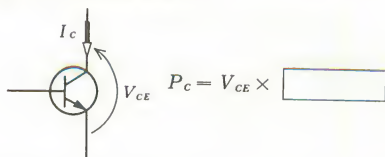
「冷やすのも 大変ですよ」

4 そこで、この点を解決するために、この章では、制御機能という面からはすこし低下するのですが、トランジスタの消費電力の面からみれば非常に有利に負荷を制御できるというON-OFF制御について学習していきましょう。

よろしく お願いします。

### 5 ON-OFF制御

すでに学んだように、トランジスタでの消費電力  $P_c$  は、 $V_{ce}$  も加わり、 $I_c$  も流れるために生じます。



ハイ ハイ  
この $P_c$ が問題だ。

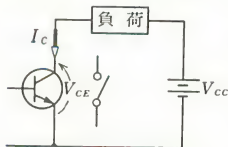
$I_c$

6 ところで、トランジスタのコレクタ・エミッタ間がスイッチのような働きをするとどうでしょう。

スイッチの状態によって、 $V_{ce}$  や  $I_c$  はつぎのようになります。

スイッチがはいったとき  $\Rightarrow V_{ce} = \text{(ア)}$

スイッチが切れたとき  $\Rightarrow I_c = \text{(イ)}$



(ア) 0

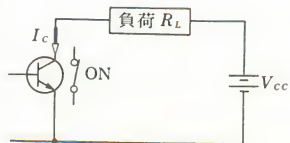
(イ) 0

7 すなわち、図 a のようにスイッチがはいっているときは、 $I_c$  には  $V_{cc}/R_L$  の電流が流れますが、 $V_{ce}$  は 0 となるため、消費電力  $P_c$  は (ア) となります。

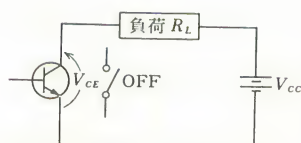
$$P_c = V_{ce} \times I_c = 0 \times \frac{V_{cc}}{R_L} = 0$$

また、図 b のようにスイッチが切れているときは、 $V_{ce} = V_{cc}$  となりますが、電流が流れませんから、 $P_c$  はやはり (イ) です。

$$P_c = V_{ce} \times I_c = V_{cc} \times 0 = 0$$



(図 a)



(図 b)

(ア) 0

(イ) 0

ナルホド  
スイッチは消費電力がないわけか

「そうですよ。  
放熱板のついた スイッチを  
見たことがありますか」

8 このように、トランジスタにスイッチのような働きをさせて負荷を制御すると、トランジスタ内部での消費電力はほとんど0となります。

したがって、熱の発生も非常に少なくなり、トランジスタに放熱板をつけなくてもかなり大きな負荷を制御することができるようになります。

でも トランジスタは  
スイッチじゃ ないですよ

「まあ まあ  
そう あせらずに」

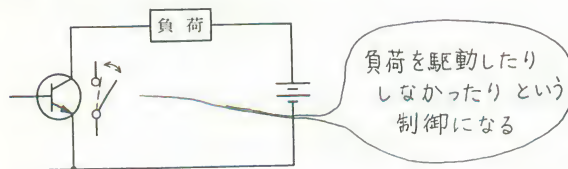
9 しかし、この場合は、前章で学習したような連続的な負荷の制御はできません。

負荷が駆動されるか、されないかという単純な制御になります。

スイッチがONになる ⇒ 負荷が駆動される。

スイッチがOFFになる ⇒ 負荷が駆動されない。

このような制御のことを、負荷をON、OFFする制御ということとで、ON-OFF制御といっています。



フン フン

10 ところで、いままでトランジスタにスイッチのような働きをさせることができれば、という仮定の形で話を進めてきましたが、実は本当にトランジスタを用いてスイッチと同じような動作をさせることができるのです。

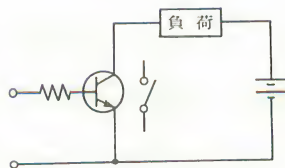
そこで次に、どのようにすればトランジスタにスイッチのような働きをさせることができるのかを、すこし考えてみましょう。

ハイ 考えましょう

# トランジスタのスイッチング作用

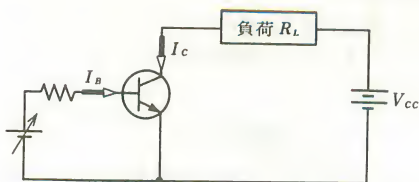
この回路は、エミッタに抵抗がはいっていませんから、 $h_{FE}$  の値によってコレクタに流れる電流がバラついてきます。

しかし、あえてこうしておいて、入力電圧を非常に低くしたり高くしたりすると、トランジスタのコレクタ・エミッタ間がスイッチと同じような動作をするようになります。



ベースにつけた抵抗は、  
入力電圧を 高くしたとき、  
ベース電流が 流れ過ぎて  
トランジスタが 破壊する  
のを、アゲ止すためのもの  
です

12 まず、図の回路に入力電圧を加えたときの動作をみておきましょう。



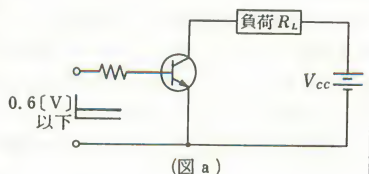
- ① 入力電圧を 0 [V] からしだいに上昇していくと、0.6 [V] 程度までは  $I_B$  も  $I_C$  も流れません。
- ② やがて 0.7 [V] 近くになると、この回路にはエミッタ抵抗がはいっていないので  $I_B$  が急激に増大し、同時に  $I_B$  の  $h_{FE}$  倍のコレクタ電流  $I_C$  が流れます。
- ③ そして、さらに入力電圧を上昇させると、 $I_B$  は増加しますが、 $I_C$  の値は  $\frac{V_{CC}}{R_L}$  以上にはなりません。

なぜ  $\frac{V_{CC}}{R_L}$

なぜ  $\frac{V_{CC}}{R_L}$  以上に  
ならないのですか？

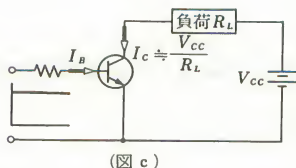
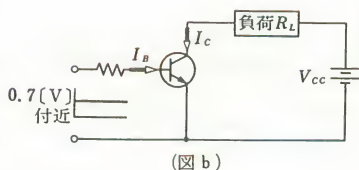
「トランジスタは  $I_B \cdot h_{FE}$  のコレクタ電流を流そうとするのですが、 $R_L$  が  $\frac{V_{CC}}{R_L}$  以上の電流を流させないのです」

13 すなわち、入力電圧が 0.6 [V] 以下では図 a のようにコレクタ電流は\_\_\_\_\_。



流れません。

次に、入力電圧を上昇させていって、0.7 [V] 程度になると図 b のようにコレクタ電流  $I_C$  が流れ始め、さらに入力電圧を上昇させると、 $I_C$  の値は図 c のように、負荷回路によって定まる  $\frac{V_{CC}}{R_L}$  の値になってしまいます。



ここで、入力電圧が低く、 $I_C$  が流れない状態をしゃ断状態といい、また入力電圧が高く、 $\frac{V_{CC}}{R_L}$  のコレクタ電流が流れる状態を飽和状態といっています。

トランジスタの C-E 間が、断絶したようになっている状態をしゃ断状態、トランジスタがもつ  $I_E$  を流そうとしているのに、その電流を供給できない状態を飽和状態というわけですね

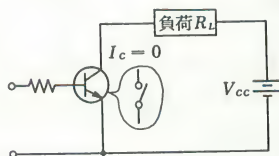
「そういふこと」



14 いま考えた三つの状態のうち、入力電圧を低くしてトランジスタをしゃ断状態にしたときと、入力電圧を高くしてトランジスタを飽和状態にしたときとの二つの状態だけに着目すると、結局、トランジスタはこの二つの状態でスイッチのOFFとONの状態を実現していることになります。

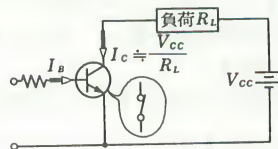
(1) 入力電圧が0.6[V]以下の状態

$I_c = 0 \Rightarrow$  スイッチ OFF



(2) 入力電圧が大きく、トランジスタが飽和している状態

$I_c \doteq \frac{V_{cc}}{R_L} \Rightarrow$  スイッチ \_\_\_\_\_



「トランジスタが ちょうどスイッチ と同じような働きをしているでしょ」

なー んぼど

ON

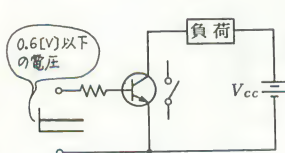
15 つまり、いままでのようにベースに連続的な入力を与えるのではなく、 $I_c$ を流さないような電圧か、またはトランジスタを飽和させるような電圧のいずれかだけを加えるようにすれば、トランジスタは \_\_\_\_\_ と同じような動作をするようになるわけです。

トランジスタにこのような動作をさせることをスイッチング動作をさせるといいます。

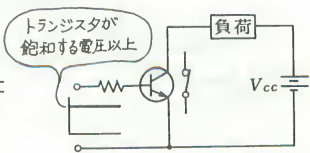
スイッチ

ナルホド

「トランジスタがスイッチ のように見えてきたかな」



(図 a) スイッチ OFF

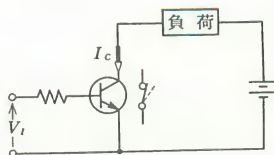


(図 b) スイッチ ON

16 トランジスタのスイッチング動作は、負荷を制御する場合だけでなく、いろいろな使い方をしますから、ここでスイッチング動作のさせかたをしっかりと理解しておいてください。

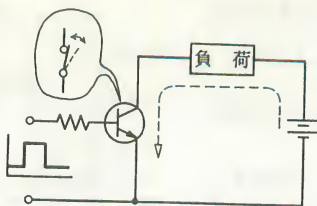
スイッチ OFF  $\Rightarrow I_c$ が流れないような電圧  $V_i$ を与える。

スイッチ ON  $\Rightarrow I_c$ が飽和するような電圧  $V_i$ を与える。



エミッタ回路に抵抗がない場合は、基本的にはスイッチング動作をさせていると考えればいいのです。エミッタ回路に抵抗がない場合は、 $V_{BE}$ によって、 $I_c$ がバラついてしまうので、増幅器としては、使用できません。

17 すなわち、図のような回路で、いままでのようにベースに連続的な入力を加えるのではなく、高い電圧か、または低い電圧かのいずれかだけを加えるようにすると、トランジスタはスイッチのような働きをして、負荷をON-OFF制御できるようになるのです。



高い電圧 → スイッチ ON  
低い電圧 → スイッチ OFF  
ですネ

このような動作をさせる回路をON-OFF制御回路といっています。

「そういうこと」

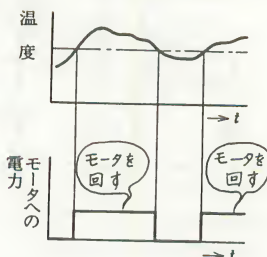
18 このようにするとトランジスタでの消費電力は少なくなり、放熱板なしでもかなりの負荷を制御できるようになります。

ただし、負荷に対しては電流を流すか、流さないかという二つの制御しかできません。

しかし、このような制御方法も、すこしくふうするとじゅうぶんに利用価値のあるものになります。

「次のフレームへ どうぞ」

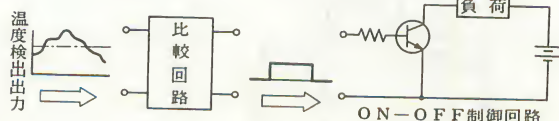
19 たとえば、温度を検出してモータを制御するという場合、ある温度に達するとモータを回し、それ以下の温度になるとモータを止めるというような動作をさせると、じゅうぶん実用的なものとなります。



アルホド  
ナルホド

20 すなわち、温度を検出し、電圧増幅した出力とON-OFF制御回路との間に、ある一定の電圧レベル以上の入力がはいると大きな電圧出力を出し、またそのレベル以下になると出力がほぼ0となるような回路をつけ加えるといいわけです。

つまり、図のように一定の電圧レベル以上になれば高い電圧出力を出し、また、その電圧レベル以下になれば低い電圧を出すというような比較判定の動作をする比較回路をつけ加えるのです。



フン フン

・一定温度以上になる



高い電圧がでる



負荷が駆動される

・一定温度以下になる



低い電圧になる



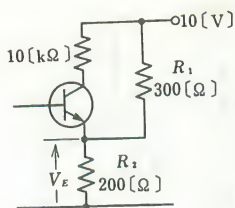
負荷が駆動されない  
というわけですね

21 では次に、このような比較判定動作をする回路はどのようにすればつくれるのかを考えてみましょう。

第4章では、図のような回路の動作を考えました。

この回路では  $R_1$ 、 $R_2$  として  $300[\Omega]$ 、 $200[\Omega]$  が接続されていますから、電圧  $V_E$  の値は \_\_\_\_\_  $[V]$  になっています。

したがって、この回路では入力電圧が  $4.7[V]$  以上になるとトランジスタが動作し始め、増幅動作を行うようになります。

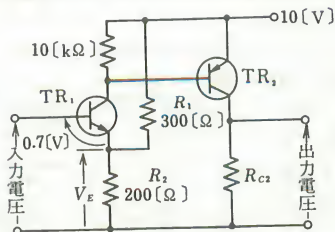
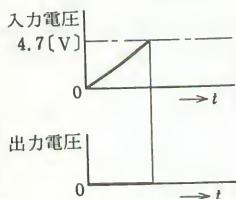


4

「覚えてますか。  
これは 3章の終りで  
学習していますよ」

22 では、この回路にもう一つトランジスタを加えて、この回路の出力をさらに増幅すると、どのようなになるでしょうか。

まず、 $V_E$  の値が  $4[V]$  ですから、入力電圧が  $4.7[V]$  以下のときは  $TR_1$  も  $TR_2$  も動作せず、出力電圧も  $0[V]$  となっています。



ワーム

「 $TR_1$  が動作しなければ、  
10 kΩ 両端の電圧は  $0[V]$   
ですから、動作しないでしょ」  
「 $TR_2$  が動作しなければ、  
 $R_{C2}$  での電圧降下が  $0$  で  
出力電圧も  $0$  になります」

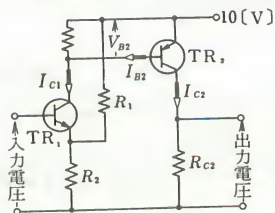
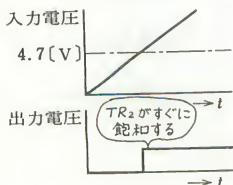
フン フレ

23 次に、入力電圧が  $4.7[V]$  以上になると、 $TR_1$  のベース電流が流れ始め、コレクタ電流  $I_{C1}$  が流れるようになります。

そして、 $I_{C1}$  が増加し、 $V_{B2}$  が  $0.7[V]$  以上になると、 $I_{B2}$  が流れ始め、 $TR_2$  のコレクタには増幅された大きな電流  $I_{C2}$  が流れるようになります。

つまり、 $I_{C1}$  が流れ始めると、この電流は  $TR_2$  で増幅されて  $I_{C2}$  は急激に増加し、 $R_{C2}$  での電圧降下(出力電圧)も急激に増加するわけです。

そして、 $TR_2$  はすぐに飽和し、ON 状態となってしまいます。



フン フン

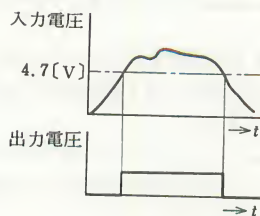
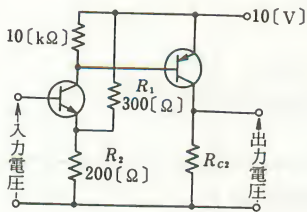
入力電圧が  $4.7[V]$  以上になると、すぐに  $TR_2$  が ON になってしまふ ということですね。

「そうですよ」

24 すなわち、図の回路は入力電圧が  $4.7\text{ [V]}$  になると出力電圧が上昇し始め、さらにすこし上昇するとすぐに  $\text{TR}_2$  が \_\_\_\_\_ 状態となって、出力電圧がほぼ電源電圧  $10\text{ [V]}$  になるという動作をします。

飽和

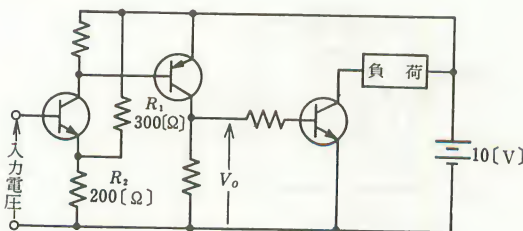
つまり、 $4.7\text{ [V]}$  を境にして、それ以下の入力電圧なら出力はほとんど  $0\text{ [V]}$  となり、それ以上の入力電圧なら約  $10\text{ [V]}$  の出力を出すという比較判定動作をするようになるわけです。



フン フン

なるほど

25 したがって、この比較回路の後段に図のように ON-OFF 制御回路を接続しておくと、負荷を ON-OFF 制御することができるわけです。



- (1) 入力電圧が  $4.7\text{ [V]}$  以上になれば  $V_o$  が約(ア) \_\_\_\_\_  $\text{[V]}$  となり、負荷が駆動されます。
- (2) 入力電圧が  $4.7\text{ [V]}$  以下のときは  $V_o$  が約(イ) \_\_\_\_\_  $\text{[V]}$  となり、負荷は駆動されません。

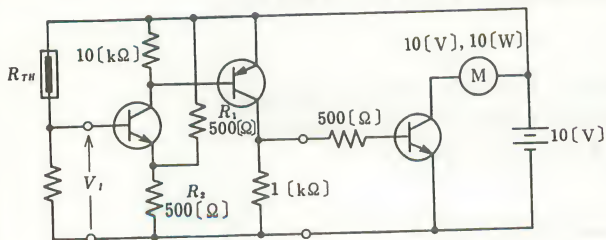
(ア) 10

(イ) 0

「入力」のところに  
検出出力を加えれば、  
どう なるかな」



26 図の回路はサーミスタを用いて温度を検出し、その出力電圧を比較判定してモータをON-OFF制御させようとした回路です。



この回路では  $R_1$ ,  $R_2$  がそれぞれ  $500[\Omega]$  になっていますから、 $V_1$  が \_\_\_\_\_  $[V]$  以上になればモータが駆動され、それ以下だと駆動されないという動作をします。

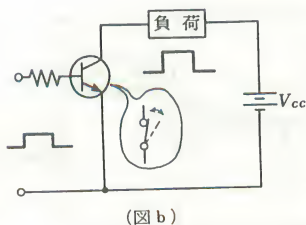
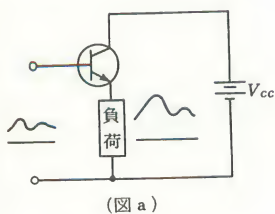
「ON, OFF制御回路  
あなたにも 作れる  
ようになりましたか」

なんとか わかってきたよう  
な気がしますぞ!

5.7

27 前章で学習した図 a のような負荷制御の方法は、入力電圧によって連続的に負荷を制御させるやり方でした。

しかし、図 b のように、トランジスタにスイッチング動作をさせ、ON-OFF制御をさせるようにすると、連続的に負荷を制御させることはできませんが、トランジスタでの消費電力を非常に少なくできるので熱発生をおさえられ、大きな放熱板をつけたりせずに負荷を制御できます。



小電力の場合ならば、いままでのような電力増幅回路を使うのですが、大きな負荷を制御しようという場合には、一般にこのような方法がとられています。

また、機能的にもこのような制御方法のほうがよい場合もあります。

「ここで  
一段落 つけましたので。  
休憩 にしましょう」

ハイ



28 いままでの学習で ON-OFF 制御とはどのようなものか、またどのようにすれば ON-OFF 制御をかけることができるのかということが理解できたと思います。

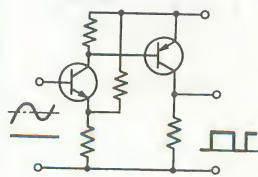
ところで、いままでの比較回路には一つ問題点があります。

ワー  
また 問題点か

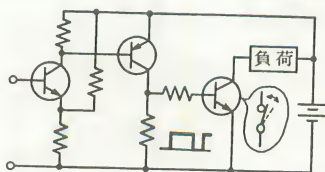
「まあ そういわずに……  
休憩したでしよ」

29 これまでの学習では、図 a のような比較回路を用いると、入力電圧がある電圧レベル以下のときは出力電圧が約 0 [V] となり、それ以上のレベルのときはほぼ電源電圧に等しい値の出力が出てきました。

ですから、その出力を図 b のように ON-OFF 制御回路に加えると、うまく負荷を制御することができました。



(図 a)



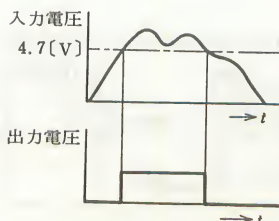
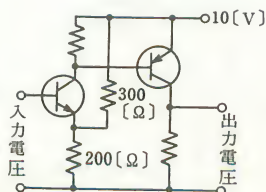
(図 b)

フン フン  
何か問題なのかな

「次のフレームへ  
どうぞ」

30 しかし、実際にはこの比較回路では、後段の ON-OFF 制御回路をうまく働かせることができない場合があります。

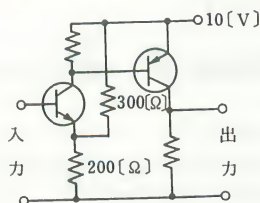
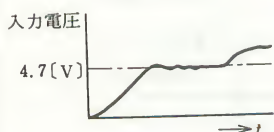
たとえば、図の回路の場合には、入力電圧が 4.7 [V] 以上になると出力が約 10 [V] となり、それ以下の入力電圧だと出力はほぼ 0 [V] になると考えていました。



何か 思わぜぶりだなア

「問題点か  
わかるかな」

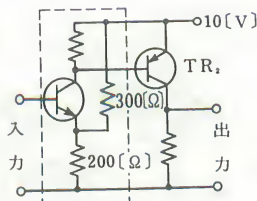
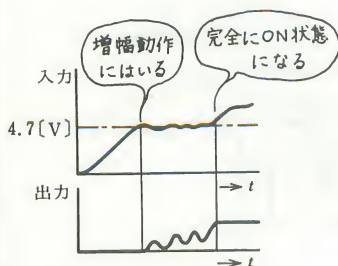
31 ところで、この回路に図のように、4.7[V]付近の状態が続く入力電圧を加えると、どのような出力が現れるでしょうか。



4.7[V] 以上か、以下かで  
判定動作をするわけでは

「実は そう なら ない のです」

32 この回路は、単に破線部の増幅器出力をさらに増幅しただけの回路ですから、このように 4.7[V] 付近の入力電圧を加えると、出力電圧は図のように、高い電圧でもなく、またほぼ 0[V] の低い電圧でもない増幅出力が出るようになります。



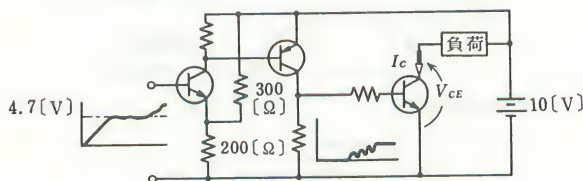
なるほど

TR<sub>2</sub> が ON か、OFF に  
なりきれずに、中間の状態  
に、なっているわけだ。

「そういうこと」

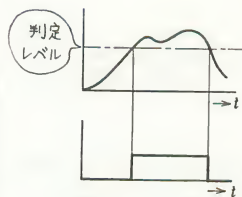
33 このような出力が出るようになると、次段の ON-OFF 制御回路のトランジスタはスイッチング動作ができなくなり、図のようにコレクタ電流  $I_C$  も流れ、かつ  $V_{CE}$  も発生するという動作をするようになります。

こうなると、単に ON-OFF 動作をさせることができないだけでなく、トランジスタでの電力消費が大きくなり、トランジスタが焼損してしまいます。

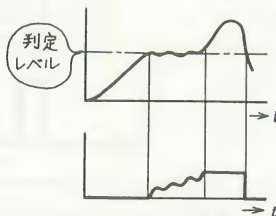


ワー 消火班  
消火班

34 すなわち、いままで学習してきた比較回路では、図 a のように入力電圧が比較判定レベルを非常に速く通過した場合はよいのですが、図 b のように判定レベル付近に長くとどまるときは問題があるのです。



(図 a)



(図 b)

中途半端は イヤって  
わけですね。

「スイッチング回路ではネ」

35 したがって、ON-OFF制御回路を確実に動作させるためには、たとえ図のように判定レベル上で非常にゆるやかに変化する入力電圧を加えても、出力には高い電圧か、またはほぼ 0 [V] の低い電圧かの、いずれかの出力だけを出すような比較回路が必要になります。

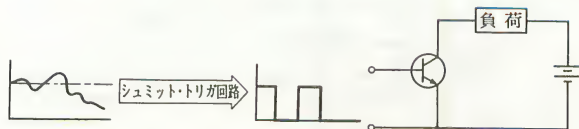
このような比較判定動作をする回路を、シュミット・トリガ回路といっています。



「のどもと 過ぎれば」  
新しさ わすれちゃうじゃ  
アツメ なわけですよ」

ハイ わかりました

36 連続した入力信号電圧によって負荷を確実に ON-OFF 制御するには、中間の値をもたない信号電圧をつくるための \_\_\_\_\_ 回路が利用されています。



シュミット・トリガ

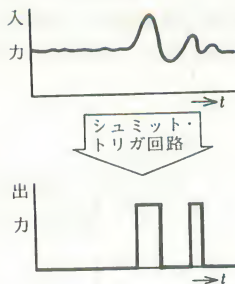
そこで、次にはこのようなシュミット・トリガ回路について学習していきましょう。

「シュミットとは  
発明者の名前ですよ」

37

## シュミット・トリガ回路

シュミット・トリガ回路とは、比較回路の一種で、図のように入力には連続的な信号がはいってきても、出力には後段のトランジスタにON-OFF動作をさせるために、中間の値をもたない、高い電圧か低い電圧かのいずれかの出力を出すという回路です。



「イエスカ ノーカ  
ハッキリ レないヨ」

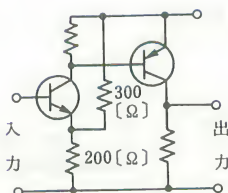
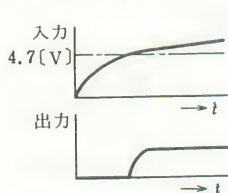
ハイ ローと

38 シュミット・トリガ回路の構成のしかたにはいろいろな方法がありますが、ここではさきほどの比較回路を応用したものについて学習しておきましょう。

「オペアンプを活用した  
方法についても うちに  
学習します」

39 図の回路はさきほど学習した、4.7[V]以上の入力が入力に高い電圧を出すという比較回路です。

すでに述べたとおり、このままの回路では、図のように入力電圧が4.7[V]付近をゆっくり上昇したときは、出力電圧も図のようにゆっくり上昇するようになります。

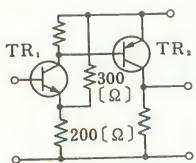


ハイ ハイ  
中途半端にならなければ

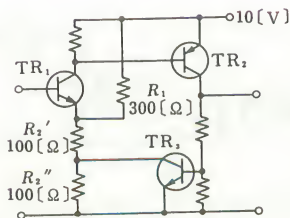
「そういうこと」

40 そこで、この回路にトランジスタをもう一つ加えて、図bのように接続するとどのようなようになるのでしょうか。

実は、このようにすると中間の出力を出すことのない動作をさせることができるようになります。



(図 a)



(図 b)

へー！  
なぜかな

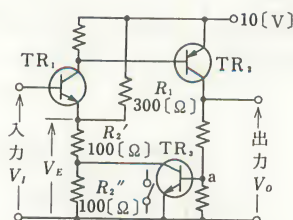
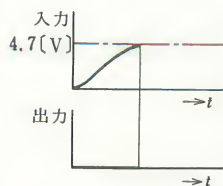
「次のフレームへ  
どうぞ」



41 では、この回路がどのように動作して中間の値を出力しなくなるのかを、順序よくみていきましょう。

まず、入力電圧 ( $V_i$ ) が 0 [V] のときには出力電圧 ( $V_o$ ) も 0 [V] となり、点 a の電位も 0 [V] となりますから、 $TR_3$  はまったく動作せず、 $TR_3$  を接続していないときと変わりません。

そして、図の回路では  $V_{cc} = 10$  [V] で、 $R_1$ 、 $R_2'$ 、 $R_2''$  がそれぞれ 300 [ $\Omega$ ]、100 [ $\Omega$ ]、100 [ $\Omega$ ] ですから、 $V_E$  の値は \_\_\_\_\_ [V] となっており、入力電圧が 4.7 [V] 以下であれば出力電圧はやはり 0 [V] となります。



「ここからは、あせわずに回路図で、確認しながら読んで下さいヨ」

4

42 では、入力電圧が 4.7 [V] 付近まで上昇してくると、どのようなのでしょうか。

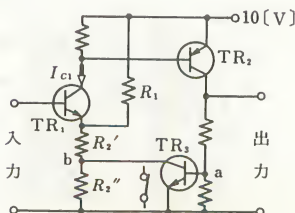
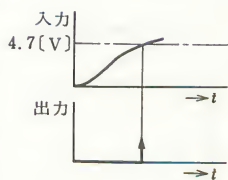
この場合は、つぎのような動作をします。

(1) 入力電圧が 4.7 [V] をすこし上昇すると、出力電圧も上昇し、点 a の電位も高くなって  $TR_3$  が ON になり始めます。

(2)  $TR_3$  が ON になり始めると、 $R_2''$  が短絡される方向に働きま  
すから、点 b の電位が  $\left\{ \begin{array}{l} (ア) \text{ 上が} \\ (イ) \text{ 下が} \end{array} \right\}$  ります。

(3) 点 b の電位が下がると、 $TR_1$  のエミッタの電位も下がる方向に働きますから、 $TR_1$  のベース電流が  $\left\{ \begin{array}{l} (ウ) \text{ 増加} \\ (エ) \text{ 減少} \end{array} \right\}$  し、 $TR_1$  のコレクタ電流  $I_{C1}$  が増加します。

(4) すると、出力電圧はさらに上昇します。



(イ) 下が

(ウ) 増加

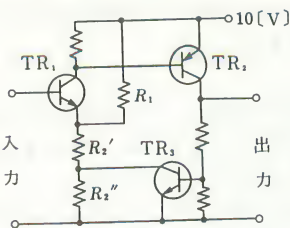
「(2) の内容がわかりますが、別の言い方をすれば、次のようになります。」

点 a の電位上昇  
↓  
 $TR_3$  の  $I_{C3}$  増加  
↓  
 $R_2''$  での電圧降下減少  
↓  
点 b の電位低下」



43 さて、入力電圧が4.7[V]近くまで上昇したときの出力電圧はどのようになりましたか。

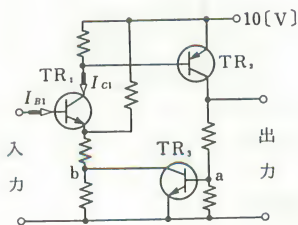
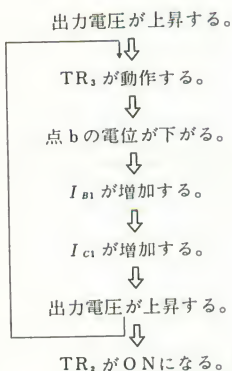
入力電圧が4.7[V]近くまで上昇し、出力電圧が上昇始めると、 $TR_3$ を通じて、さらに出力電圧が\_\_\_\_\_していきようになりますね。



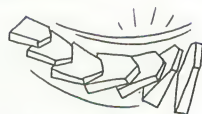
「前フレームの  
まとめですよ」

上昇（または増加）

44 つまり、図のように  $TR_3$  を接続しておく、と、出力電圧が上昇し始めるとともにつぎのような現象が起こり、最終的に  $TR_2$  はONとなり、出力には高い電圧（約10[V]）が出ることになります。



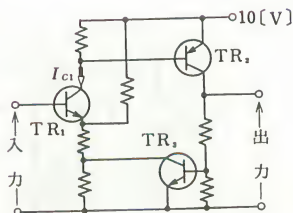
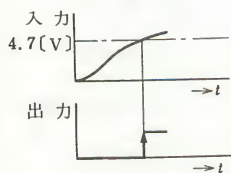
アールホド  
持模倒し式に  
動作をするわけですね



「ホー うまく うねね」

45 すなわち、 $TR_3$  を図のように接続しておく、と、どんなにゆっくりと入力電圧が上昇しても、入力電圧が4.7[V]程度になると出力電圧が上昇し始め、 $TR_3$  が動作して自動的にさらに  $I_{C1}$  を増加させる方向に働き、出力電圧が高い電圧になってしまうわけです。

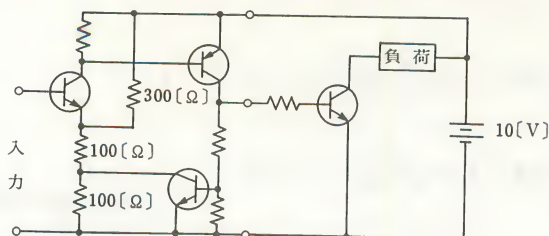
こうして出力電圧が中間の値をとることはなくなり、シュミット・トリガ動作をするようになります。



「持模倒し式 だヨ」

ハイ わかりました

46 したがって、この回路の出力に ON-OFF 制御回路を接続しておくと、確実に ON-OFF 制御を行わせることができます。



フン フン

中途半端で  
止まることはないわけだ

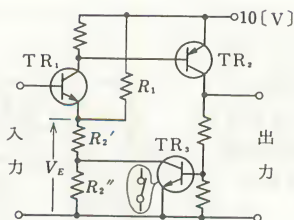
47 さて、このシュミット・トリガ回路は、すこし変わった特性を持っています。

つまり、こうして出力電圧が高い電圧値（約10[V]）を出そうとになってしまうと、こんどは入力電圧を4.7[V]以下の値にしても、出力電圧がもとの約0[V]にはもどらなくなってしまうのです。

図の回路で出力電圧が高くなり、 $TR_3$  が ON になっている状態では、 $R_2''$  が  $TR_3$  によって短絡された形になって、 $V_E$  の値がつぎのようになっています。

$$V_E = \frac{R_2'}{R_1 + R_2'} V_{CC}$$

この値を前フレームの定数で計算すると \_\_\_\_\_ [V] となります。



ナルホド

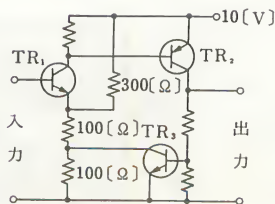
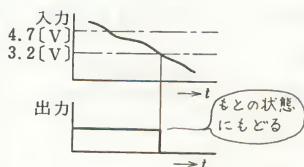
$V_E$  の値が 変って  
しまっているわけか

「そういうこと」

2.5

48 したがって、 $TR_1$  が OFF 状態となるのは、入力電圧が4.7[V]以下でなく3.2[V]以下まで下がったときになります。

つまり、この回路では、入力電圧が3.2[V]以下になれば  $TR_1$  が OFF となり、 $TR_2$ 、 $TR_3$  も OFF となって、出力電圧がもとのほぼ0[V]にもどることになります。

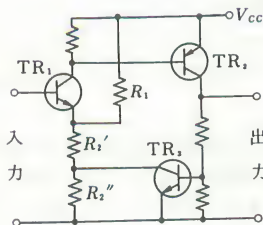
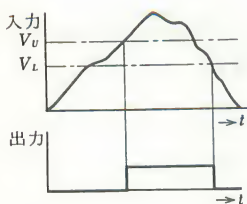


「出力電圧を再び高くするには、入力電圧をまた、4.7[V]以上に  
する必要があります」

49 つまり、図の回路において、出力電圧が高い状態（H）になるとき、または低い状態（L）にもどるときの入力電圧の値は、それぞれつぎのようになるわけです。

(出力がHになるときの入力の値) 
$$V_H = \frac{R_2' + R_2''}{R_1 + (R_2' + R_2'')} \cdot V_{CC} + 0.7$$

(出力がLにもどるときの入力の値) 
$$V_L = \frac{R_2'}{R_1 + R_2'} \cdot V_{CC} + 0.7$$

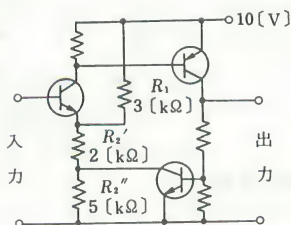


アレ アレ  
判定レベルが二つできると  
いうことか

「そういうこと  
HやLは、  
High(高い), Low(低い)  
の略ですよ」

「行きと帰りが  
ちょっと違うんですよ」

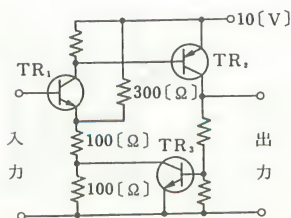
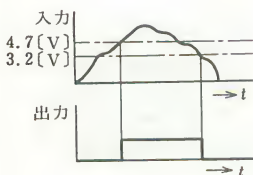
50 たとえば、図の回路では、出力をHにする入力電圧の値は、  
(ア) \_\_\_\_\_ [V]となり、また出力をLにするときの入力電圧の値は(イ) \_\_\_\_\_ [V]となります。



(ア) 7.7

(イ) 4.7

51 すなわち、図のように回路を構成すると、中間の出力を出さなくなるかわりに、出力電圧がLからHになるときの入力電圧の値と、出力電圧がHからLにもどるときの入力電圧の値とが異なる動作をするようになります。

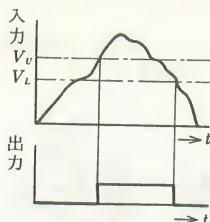


フン フン  
でも ころなると  
比較回路としては、有るか  
わいぶんじゃないかなあ

「もう少し進んでから  
考えることにしましょう」

52 つまり、シュミット・トリガ回路は、基本的には比較判定動作をする回路なのですが、中間の出力をなくするために、図のように出力をHにするレベルと、出力をLにするレベルとが別々に現れるような動作をするわけです。

この点が、一般にいわれる比較回路とは異なるシュミット・トリガ回路特有の特性なのです。



「この現象を  
ヒステリシス現象と  
いっていますヨ」

53 シュミット・トリガ回路は、中間の出力が出ないようにするために、このように出力に高い電圧Hを出すレベル ( $V_H$ ) と、低い電圧Lを出すレベル ( $V_L$ ) の、二つの判定レベルをもつような動作をします。

わかりました

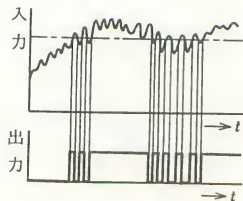
54 ところで、この特性が、実は制御動作をさせるうえでもつごうのよい場合があるのです。

たとえば、温度などを検出してくる場合、その検出出力をこまかく見ると、つぎのようになんか微小な変動をともないながら変化しています。

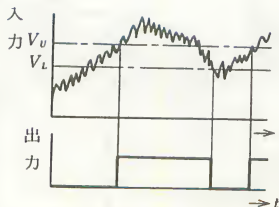
このようなとき、回路がある一つだけのレベルを基準にして、出力にHとLを出す動作をしていると、図aのように出力は絶えずこまかく変動するようになります。

すると、それにとまって出力段は駆動されたりされなかったりという意味のない変動を続けるだけでなく、機器の寿命を短くする原因にもなります。

しかし、図bのように  $V_H$  と  $V_L$  の二つのレベルで動作するようになれば、入力の変動に影響されない安定した動作を行うようになります。



(図 a)



(図 b)

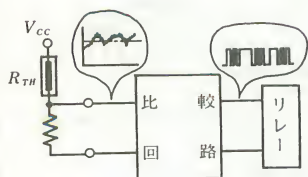
図aは…  
神経過敏型、  
図bは…  
ゆったり型  
ですね

「あなたは  
どのタイプ？」

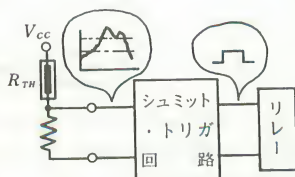


55 たとえば、検出してきた温度でリレーを働かせようという場合などでも、図 a のような回路構成で動作させていると、リレーの接点が無意味に ON と OFF を繰り返し、リレーの寿命が非常に短くなってしまいます。

ところが、図 b のようにシュミット・トリガ回路を入れて動作させると、このようなことがなくなります。



(図 a) シュミット・トリガ回路を用いないとき

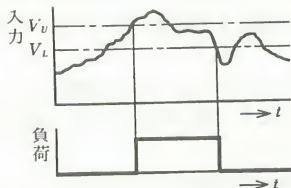
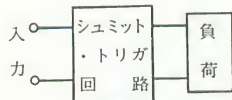


(図 b) シュミット・トリガ回路を用いたとき

ナルホド  
ナルホド

「このようなこと啊、  
リレーなどを駆動する  
場合は、(ぼとんど)って  
よいほど、シュミットトリガ  
回路が用いられています」

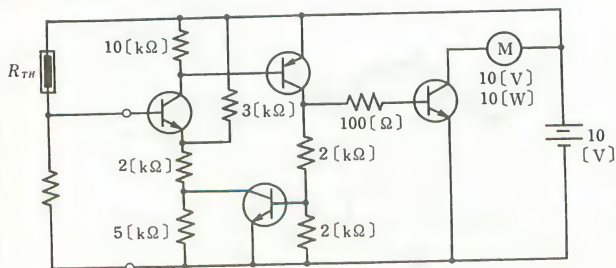
56 また、出力を H にするレベルと、出力を L にするレベルを積極的に利用すると、どの入力電圧レベルで負荷を駆動し、どの入力電圧レベルで負荷を OFF にするかという設定が、自由にできるようになります。



でも一つのレベルに  
することは、できない  
わけでしょ

「長所を伸ばせよう」

57 図の回路は、温度検出器からの出力電圧が(ア) \_\_\_\_\_ [V] 以上になるとモータを駆動し、約(イ) \_\_\_\_\_ [V] 以下になるとモータを停止させるという ON-OFF 制御回路です。



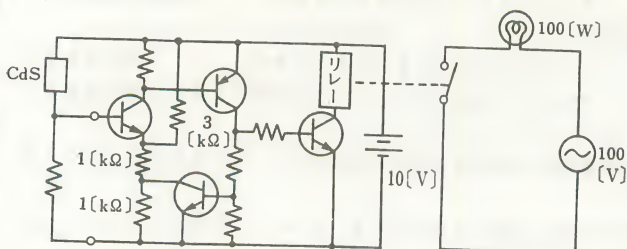
(ア) 7.7

(イ) 4.7

わかりますネ



58 また、図の回路は CdS で明るさを検知し、その出力電圧が 4.7[V] 以上になるとリレーを働かせてランプを点灯し、  
[V] 以下になるとランプを消灯するという回路の一例です。



3.2

リレーを使って、  
100[V] のランプを  
駆動しているわけですね

「そうです」

59 さて、ON-OFF 制御回路とシュミット・トリガ回路の動作は理解できましたか。

これで電子制御の基本となるトランジスタを用いた制御については、学習を終わります。

次章からは、第二段階の学習として、トランジスタ以外の半導体素子を用いた制御について学習していきましょう。

「どうも ご苦労さんでした。  
これから  
トランジスタも  
よろしくね」

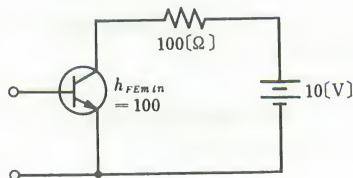
## 練習問題

1 つぎの文章の \_\_\_\_\_ の中に適する言葉を入れ、文章を完成しなさい。

- (1) ON-OFF 制御回路とは、トランジスタにスイッチのような働きをさせて、負荷を駆動したり、しなかったりという動作をさせるもので、この回路の特徴は、トランジスタの消費電力が \_\_\_\_\_ く、熱発生が少ないということです。
- (2) トランジスタにスイッチのような働きをさせることを(ア) \_\_\_\_\_ 動作をさせるといい、トランジスタに加える電圧を低くしてしゃ断状態にしたり、電圧を高くして(イ) \_\_\_\_\_ 状態にしたりして利用します。
- (3) 検出器や電圧増幅器からの連続的な信号で負荷を ON-OFF 制御するには、比較回路が必要です。

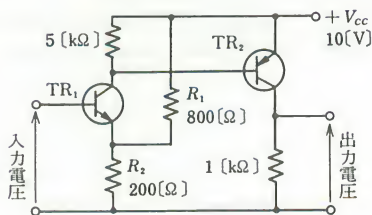
この比較回路の中でも、中間の出力を出さないようにした回路を \_\_\_\_\_ 回路といっています。

- 2 図の回路でトランジスタを ON にするためには、ベース電流をいくら以上流す必要がありますか。



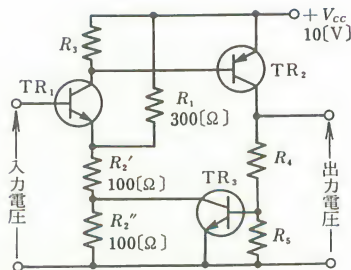
- 3 図は比較判定動作をさせようとした回路ですが、入力電圧が何ボルト以上になれば出力にほぼ10[V]の電圧が出るようになりますか。

また、この回路で判定レベルを5.7[V]にするには、 $R_2$ の値をいくらにする必要がありますか。



- 4 図はシュミット・トリガ回路です。

この回路で出力電圧を高くする入力電圧の値  $V_H$ 、および出力電圧を低くする入力電圧の値  $V_L$  は、それぞれいくらになりますか。



## 6. サイリスタとON-OFF制御

### 学習の目標

1. トランジスタによる ON-OFF制御の欠点を知り、サイリスタによる ON-OFF 制御の特徴を学習する。
2. サイリスタとはどのようなものかを知り、SCRとトライアックを用いた ON-OFF 制御の方法について学習する。
  - (1) SCRやトライアックとは、どのようなものか。
  - (2) SCRやトライアックをどのように活用すればON-OFF制御ができるのか。
  - (3) SCRやトライアック回路の各定数はどのように設定すればよいのか。



## 学習の概要

### 1. サイリスタ

サイリスタとは電力制御用の半導体スイッチング素子のことで、その中にはつぎのようなSCRやトライアックと呼ばれているものがあります。



SCR



トライアック

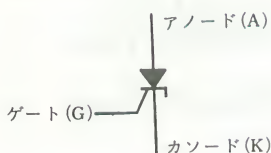


### 2. SCR

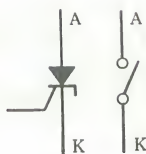
- (1) SCRとは、半導体スイッチング素子の一種で、図aのような図記号で示され、アノード(A)、カソード(K)、ゲート(G)という3本の端子をもっています。

そして、図bのようにAK間がスイッチの接点の働きをします。

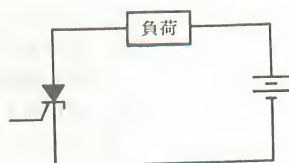
- (2) したがって、図cのように電源と負荷とSCRのA-K間を接続しておくと、SCRをON、OFFさせることによって負荷をON-OFF制御することができますようになります。



(図 a) SCRの図記号



(図 b)



(図 c)

### 3. SCRの動作

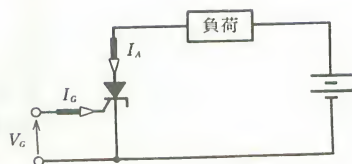
- (1) SCRはアノード(A)-カソード(K)間に順方向電流が流れるように電源電圧 $V_{cc}$ を加えておいて、ゲートからカソードの方向にゲート電流を流せば、AK間がONの状態になります。

そして、一度ONになると、ゲート電流を0にしてもON状態は保持されます。

- (2) SCRをONにするために必要なゲート電流 $I_g$ の値と、ゲート・カソード間電圧 $V_g$ の値を、それぞれゲート・トリガ電流、ゲート・トリガ電圧といっています。

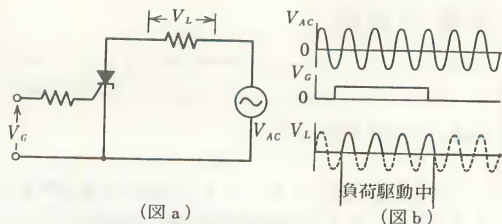
- (3) SCRをONにしたのち、もとのOFF状態にもどすには、アノード端子に流れている電流( $I_A$ )をある値以下にする必要があります。

この電流値を保持電流といっています。



#### 4. SCRによるON-OFF制御

図 a のように交流電源を用いた回路にゲート・トリガ電圧を加えると、図 b のような動作をして負荷をON-OFF制御できます。

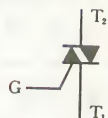


#### 5. トライアック

(図 a)

トライアックは、図のような図記号で示され、 $T_1$ ,  $T_2$ , G の 3 本の端子をもっています。

そして、 $T_1T_2$ 間がスイッチの接点の働きをします。

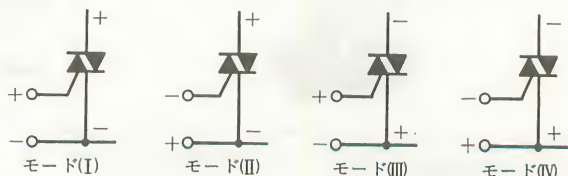


#### 6. トライアックの動作

(1) トライアックは $T_1T_2$ 間に電圧が加わっていれば、その極性に関係なく、ゲート・トリガ電圧を加えることによってONにすることができます。

そして、このゲート・トリガ電圧の極性にも制約はありません。

(2) トライアックをONにする状態にはつぎの四つがあります。



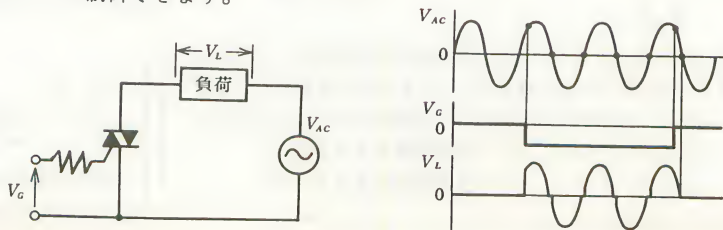
(3) しかし、ここでモード(Ⅳ)については、ゲート感度に不安定さがあるため、一般には使用しないようにしています。

(4) そこで、電源に交流電圧を用いる場合には、ゲート・トリガ電圧には一般に負の極性の電圧を加えるようにしています。

(5) トライアックをONにしたのち、もとのOFF状態にもどすには、 $T_1T_2$ 間に流れている電流を保持電流値以下にする必要があります。

#### 7. トライアックによるON-OFF制御

図 a の回路にゲート・トリガ電圧  $V_G$  を加えると、図 b のような動作をして負荷をON-OFF制御できます。





# 学習の展開

1 いよいよこの章からは、いままでの学習を基礎にして第二段階にはいっていきましょう。

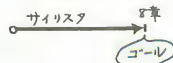
この章以降では、トランジスタ以外の半導体素子を応用して、いままで学習してきた電圧増幅部や電力制御部をさらに充実することを考えていきたいと思います。

「さあ  
いよいよ 第2段階  
ですよ」

2 まず、この章からは、サイリスタ (Thyristor) と呼ばれている半導体素子を用いた電力制御について学習しましょう。



「8章までは、サイリスタを  
応用した 電力制御に  
ついて学習していきます」



3 サイリスタとは電力制御用の半導体スイッチング素子のことで、その中にはつぎのようなSCRやトライアックと呼ばれているものがあります。



SCR

トライアック

（ SCRやトライアックという名称は実は商品名で、正式な呼び方ではないのですが、通常、このようないい方をしています。

JISでは、それぞれつぎのような名称がつけられています。

SCR..... 3 極伝導サイリスタ

トライアック..... 3 極双方向サイリスタ

「では まず  
サイリスタの 必要性  
からだよ」

「次のフレームへ じゃあ」

4 これまで負荷をON-OFF制御する場合、スイッチの働きをさせる素子としてトランジスタを用いて学習してきました。

しかし、負荷をON-OFF制御するためのスイッチング素子としては、トランジスタにはすこし不便な点があります。

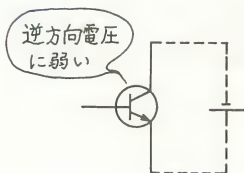
さて どういうことかな

「次のフレームへ どうぞ」

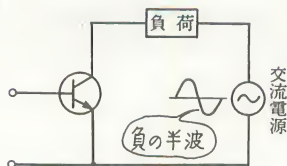
5 その一つは、トランジスタを交流電源で動作させることができないということです。

トランジスタは、図 a のような逆方向の電圧には非常に弱いという性質をもっています。

そのため、たとえば図 b のように正弦波交流を電源に用いようとしても、 $\left\{ \begin{array}{l} (ア) \text{ 正} \\ (イ) \text{ 負} \end{array} \right\}$  の半波があるために使用できません。



(図 a)



(図 b)

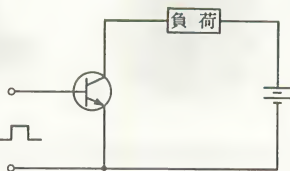
(イ) 負

ナルオド  
それで 今まで  
交流電源を使用しなかった  
わけですね

「そう いうこと」

6 もう一つは、すでに学んだように、トランジスタにスイッチング動作をさせるためには、図のように入力信号として、中間の値をもたない高い電圧(H)か低い電圧(L)かのいずれかの信号を加えなければなりません。

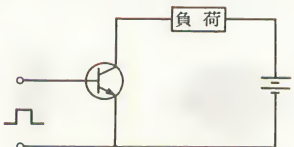
中間の電圧を加えると、トランジスタはスイッチング動作ができなくなってしまいます。



つまり  
シュミットトリガ回路を  
必要としたというわけでは

「そう いうこと」

7 すなわち、トランジスタを用いて負荷をON-OFF制御しようとする、交流電源が使えないということや、入力にHかLかのいずれかの電圧しか加えてはいけないという不便な問題があるわけです。

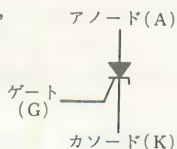


「トランジスタによる  
ON, OFF制御の欠点、  
ですよ」

ハイ よくわかりました

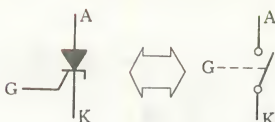
<p>8 そこで、これらの不便な点を解消したスイッチング動作専用の半導体素子として、これから学ぶSCRやトライアックなどがあるわけです。</p>	
<p>9 SCRやトライアックを用いると、100[V]の交流電源で働かせることができます。</p> <p>また、SCRやトライアックはスイッチング動作専用素子のため、負荷をON-OFF制御する場合、トランジスタにスイッチング動作をさせるときのようにあえてHやLの信号電圧をつくる必要はありません。</p> <p>したがって、電源として直接、家庭用の100[V]の電源が利用でき、しかもシュミット・トリガ回路なども不要になります。</p>	<p>何か 便利 そう感じる すよ</p> <p>「しっかり 勉強して 下さいヨ」</p> <p>ハイ</p>
<p>10 このようなことから、現在では、たとえば家庭電化製品をみても、いろいろな製品にこのSCRやトライアックが利用されています。</p>  <p>それではまず、具体的にSCRの動作や利用法について学習していきましょう。</p>	
<p>11 <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">SCR</span></p> <p>SCRとは、シリコン制御整流器 (Silicon Controlled Rectifier) の略で、つぎのようにいろいろな形をしたものがあります。</p> 	<p>整流器 (ダイオード) の 一種なんですか？</p> <p>「まあネ」</p>

12 そして、これらはそれぞれアノード(A)、カソード(K)、ゲート(G)と呼ばれる3本の端子をもっており、つぎのような図記号で表示されています。



「アノードに  
よく似た図記号でしょ」

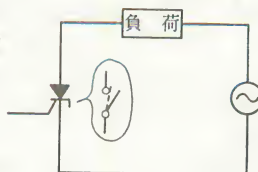
13 ここでアノード(A)とカソード(K)間がスイッチの接点の働きをし、ゲート(G)端子がその接点を制御する働きをします。



「図記号と  
名前を  
覚えて下さいヨ」

14 したがって、図のようにSCRの

(ア) — (イ) 間を負荷と電源に接続しておいて、G端子を操作すると、SCRのスイッチング動作によって負荷をON-OFF制御できるようになります。



(ア) アノード(A)  
(イ) カソード(K)

15 それではこれから、具体的にSCRがどのような動作をするのか、また、どのように活用していけばよいのかということを学習していきましょう。

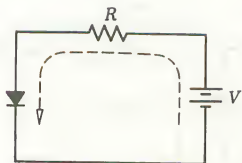
## 16 SCRの動作

SCRは、ダイオードなどと同じような一種の整流器と考えると非常に理解しやすくなります。

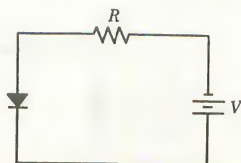
ですから、ダイオードと対比しながら、まず直流電圧を加えてその動作をみていきましょう。

ダイオードの場合は、図aのような方向に電圧を加えると、およそ  $V/R$  の値の電流が流れます。

ところが、図bのような方向に電圧を加えた場合には、電流は流れません。



(図 a)



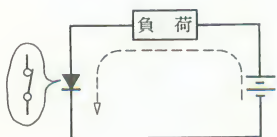
(図 b)

「ダイオードには  
順方向と  
逆方向がありましたね」

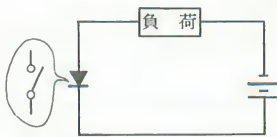


17 すなわち、ダイオードは図 a のような方向に電圧を加えた場合は、スイッチの接点を(ア)したのと同じような動作をし、図 b のような方向に電圧を加えたときは、接点を(イ)したのと同じような動作をするといえます。

そして、図 a の場合は負荷が駆動され、図 b の場合は駆動されません。



(図 a)



(図 b)

- (ア) ON  
(イ) OFF

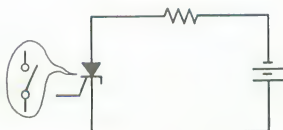
ダイオードの  
スイッチング動作ですね

「オ  
きえていますね」

18 では、SCR の場合はどうでしょうか。

SCR もダイオードと同様に、図のように逆方向に電圧を加えているときは電流をいっさい流さず、常にスイッチ \_\_\_\_\_ の状態になります。

このような方向に電圧を加えることを、逆方向電圧を加えるといえます。



OFF

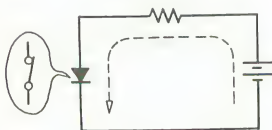
ダイオードの場合と  
同じことですね。

「 そう いうこと 」

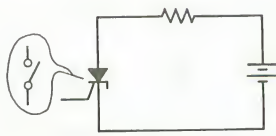
19 ところで、ダイオードの場合は、図 a のように電圧を加えるとスイッチがONになった状態と同じになりますが、SCR の場合は図 b のように電圧を加えても、それだけでは電流は流れません。

このような方向の電圧を加えることを順方向電圧を加えるといっていますが、SCR の場合は、このように順方向電圧を加えても、ただちに \_\_\_\_\_ にはなりません。

SCR のこのような状態を、順方向電圧がかかっているのに電流を流さないという意味で順阻止状態といっています。



(図 a)



(図 b) 順阻止状態

ON

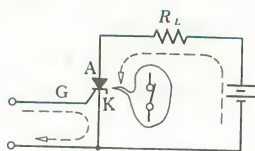
ナルホド  
じゃ どうしたら  
流れるようになるんですか

「次のフレームへ  
どうぞ」



20 ではどのようにすればSCRをONにして電流を流すことができるのでしょうか。

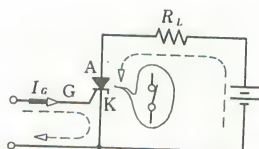
実は、SCRの場合は、図のように順方向電圧を加えておいて、ゲート・カソード間に矢印の方向に電流を流すことによってONの状態にすることができます。



「いよいよ  
ゲート端3つ  
出番ですよ」

21 SCRは、図のようにAK間に順方向電圧を加えただけでは、AK間が\_\_\_\_\_の状態にはなりません。

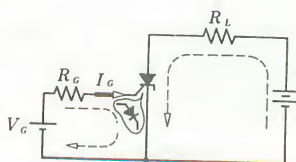
GK間に図のような方向にゲート電流  $I_g$  を流すと、初めてAK間がONになって、負荷  $R_L$  に電流が流れるようになります。



ON

22 SCRのGK間は、図のように内部的にはダイオードが構成された形になっており、図のような方向に電圧 ( $V_g$ ) を加えると、 $I_g$  が流れるようになります (抵抗  $R_g$  は、 $V_g$  によって大きな電流が流れすぎてSCRが破壊するのを防ぐためのものです)。

$V_g$  の方向が逆になると動作しませんから、注意してください。



SCRのG-K間は  
ダイオードが「入った」ように  
なっているんですか

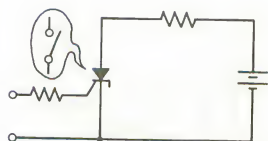
「一度 テスターでチェックしてみれば、すぐわかりますよ」

23 もう一度繰り返しますと、SCRは図aのようにAK間に順方向電圧を加えただけではONの状態にはなりません。

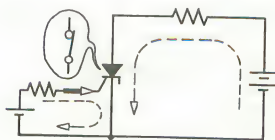
図aのように電圧を加え、さらに図bのように(ア) \_\_\_\_\_ から (イ) \_\_\_\_\_ の方向に電流を流す必要があります。

(ア) G (ゲート)

(イ) K (カソード)



(図 a) ONにならない



(図 b) ONになる

「これは 基本ですから  
カッチリ 覚えて下さいよ」

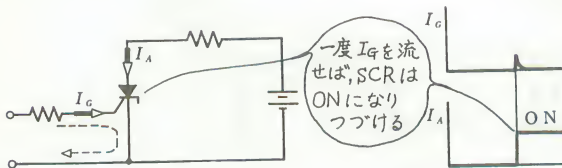
ハイ  
わかりました

24 ところで、このSCRにはもう一つおもしろい性質があります。

SCRをONにするためにはGK間に図のような向きに電流を流さなければならないということはすでに説明しましたが、この電流 $I_g$ は、SCRをONにしようとする期間中、ずっと流しておく必要はありません。

図のように、ONにし始めるその瞬間だけ電流 $I_g$ を流せば、そのあとに $I_g$ が0となってもON状態を保ち続けるのです。

つまりSCRは、一度ONにすると、それを保持する機能があるということです。



へー?

$I_g$  を流し続ける必要はないのひすか

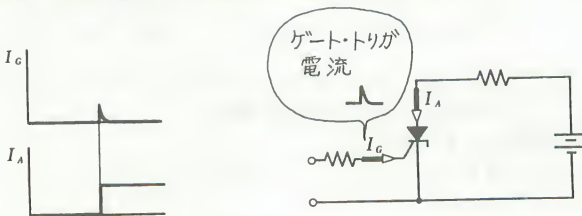
「ここが SCR の面白いところなのです」

25 つまり、SCRはAK間に順方向電圧を加えておいて、ゲートからカソード方向に瞬間的にゲート電流 $I_g$ を流すと、AK間がONになり、そのままONの状態を続けます。

もちろん、 $I_g$ をずっと流し続けても同じことです。

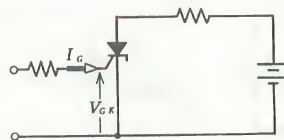
このようなことから、 $I_g$ を流してSCRをONにする操作を、火を点火するというような意味から点弧するといっています。

また、この操作をトリガをかけるともいっています。



「トリガ(trigger)とは引き金という意味があります」

26 そして、SCRをONにするために必要なゲート電流( $I_g$ )のことをゲート・トリガ電流といい、またこの電流を流すために必要なゲート・カソード間電圧( $V_{gk}$ )のことをゲート・トリガ電圧といっています。



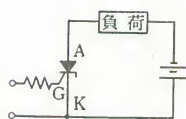
ナルホド  
ONにする引き金という意味ですね

「そういふこと」

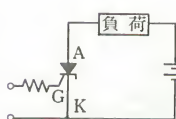
27 以上でSCRの基本動作については理解できたと思います。

SCRをONにするための条件はしっかり覚えておいてください。

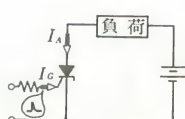
- 図 a のようにAK間に逆方向電圧を加えた場合は、ONにならない（電流  $I_A$  は流れない）。
- また、図 b のように順方向電圧を加えただけでもONにならない（ $I_A$  は流れない）。
- 図 c のようにAK間に順方向電圧を加えておいて、GからKの方向にゲート・トリガ電流  $I_G$  を流せば、ONになる（電流  $I_A$  が流れる）。そして、ONの状態が保持される。



(図 a)



(図 b)



(図 c)

「トリガをかけるのに必要なゲート電流、ゲート電圧」という意味ですヨ」

28 なお、SCRをONするために必要なゲート・トリガ電流  $I_G$  の値や、ゲート・トリガ電圧  $V_{GK}$  の値などはカタログに明記されています。つぎの表は、M23Cと呼ばれるSCRの特性値です。

	min.	typ.	max.
ゲート・トリガ電流[mA]	—	0.6	1
ゲート・トリガ電圧[V]	0.2	0.6	0.8

つまり、M23Cの場合は、ゲート・トリガ電流を1[mA]以上流せば必ずONにすることができ、また、この電流を流すのに必要な電圧 ( $V_{GK}$ ) が最大の場合でも0.8[V]であるということです。

「また、ゲート・トリガ電圧の数値は、0.2[V]となっているのは、この値以下のときには、絶対にONにならないということですよ」

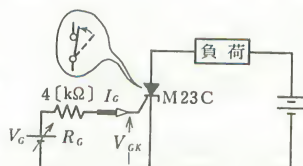
29 したがって、図の回路で  $I_G = 1$  [mA] 以上にしてSCRをONにするためには、 $R_G$  での電圧降下  $V_{RG}$  および  $V_{GK}$  の値がつぎのようになりますから、入力電圧  $V_G$  の値が \_\_\_\_\_ [V]

以上必要になるわけです。

$$R_G \text{ での電圧降下} \cdots \cdots V_{RG} = I_G R_G$$

$$= 1 \text{ [mA]} \times 4 \text{ [k}\Omega\text{]} = 4 \text{ [V]}$$

$$GK \text{ 間の電圧} \cdots \cdots V_{GK} = 0.8 \text{ [V]}$$



4.8

「大丈夫ですか」

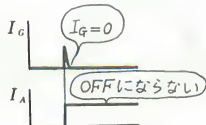
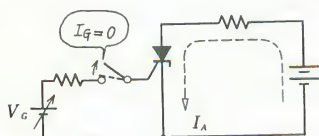
OK バッチリ

30 これまでのところで、SCRをONにするにはどうすればよいかということはわかりましたね。

そこで今度は、SCRをOFFにする方法を考えてみましょう。  
すぐに思いつく方法は、ゲート電流  $I_g$  を0にしてはどうかということですが。

しかし、 $I_g$  を0にしても、いったんONになったSCRは、もうOFFにはなりません。

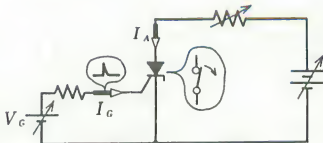
SCRは定められた値以上のゲート電流  $I_g$  を流したり、ゲート電圧  $V_g$  を加えればONになるのですが、次にもとのOFFにしようとする場合、こんどはこのゲート端子を操作してもどうにもなりません。



ナルホド  
先ほどの保持機能がかっ  
ているわけだ。  
これは 困ったぞ。  
「次のフレームへ  
どうぞ」

31 SCRをOFFにするには、実はAK間に流れている電流  $I_A$  がある値以下まで減少させる必要があるのです。

たとえば、図の回路では、  
可変抵抗を大きくしていくか、  
または電源の電圧を下げてい  
って  $I_A$  の値を \_\_\_\_\_ し  
ていき、 $I_A$  の値をある値以下  
にする必要があります。



減少

フーレ  
元をたたなさせ アメと  
いうわけですね。  
「そく いく こと」

32 ここで、SCRのAK間に流れている電流を減少させていって、もとのOFF状態にもどる限界の電流値を、SCRをONに保持するために必要な最低の電流という意味で、保持電流  $I_H$  といっています。

たとえば、つぎの値はM23Cの保持電流  $I_H$  の値を示したのですが、このSCRではAK間を流れる電流が2[mA]以下になると、もとの \_\_\_\_\_ 状態にもどるわけです。

保持電流	2[mA]
------	-------

OFF

フン フン  
ナルホドー

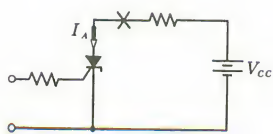


33 SCRをOFFにするための具体的な手段として、抵抗を大きくしたり、電源電圧を下げて $I_A$ を保持電流値以下にするという方法をあげましたが、そのほかにもつぎのようにしてOFFにする方法もあります。

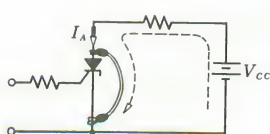
(1) 図aは $V_{cc}$ からの回路を切ってSCRに流れる電流( $I_A$ )を0にしています。

(2) また、図bはSCRのAK間を導線で短絡して、回路電流を導線側に流し、SCRに流れる電流( $I_A$ )を0にしています。

(SCRはたとえONになっていても、内部にわずかの抵抗がありますから、導線で短絡すると電流は導線側を流れるようになります。)



(図 a)



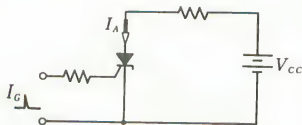
(図 b)

フン フン  
とにかく SCRに  
流れる電流を保持電流  
以下にすれば、いいわけだ。

「そう いう こと」

34 すなわち、SCRは図のようにAK間に電圧をかけておいて、 $I_G$ を瞬間的に流せばONになり、その後、なんらかの方法で $I_A$ の値を\_\_\_\_\_値以下にすると、もとのOFFの状態にもどります。

ところで、このような動作を実際に行わせようとすると、意外にめんどろになります。



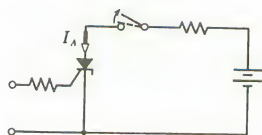
保持電流

つけるのは 便利ですが、  
消すのは 大変なんですね

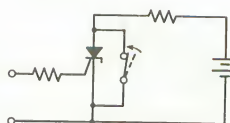
「SCRは 重たい出しなう  
止まらないうです」

35 ONにする場合は、ゲート・トリガ電圧を加えればいいのですから問題はありません。

ところがOFFにする場合は、電源電圧を操作したり、負荷を操作したり、または図aや図bのように外部から接点を動作したりしなければなりません。



(図 a)



(図 b)

フン フン



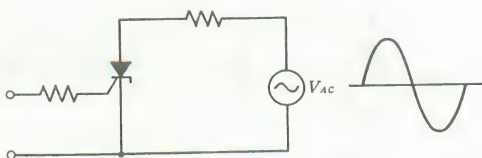
36 しかし、ここでちょっとくふうすると、簡単に処理できます。

いままでは電源が直流電源だったために、このような方法に頼らざるをえなかったのですが、たとえば正弦波交流電源 ( $V_{AC}$ ) を用いるとどうでしょう。

交流電圧の場合は、電圧が周期的に正負に変化しますから、必ず電圧値が0になるところがあり、またそれを過ぎると逆電圧がかかって電流が流れなくなります。

すると、その過程で必ず保持電流値以下になるところがあり、SCRを\_\_\_\_\_にできます。

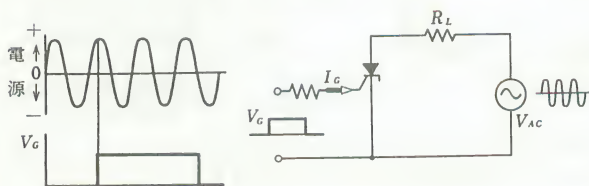
トランジスタの場合は交流電圧を加えることはできませんが、このSCRはまったく問題ありません。



OFF

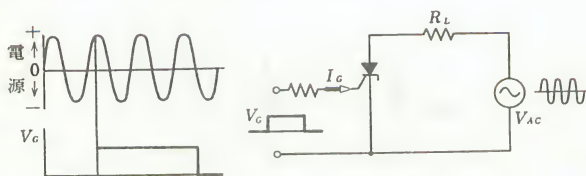
アノード  
カソード

37 それでは図のように、SCRのアノード・カソード間に交流電源と負荷  $R_L$  を接続し、図のようなゲート・トリガ電圧  $V_G$  を加えるとどのようなかを考えてみましょう。



「SCRの基本動作は  
同じことですヨ」

38 まず、図の電源波形中にSCRがONになるタイミングを↑印で、またOFFになるタイミングを↓印で示してください。



「わかりやすくするために  
 $V_{AC}$ が0になって  
アノード電流が0になれば、  
SCRがOFFになると  
考えてください。」

「答は次のフレーム参照」

39 図のようなゲート・トリガ電圧 ( $V_G$ ) を加えた場合は、点 a、点 b、点 c でそれぞれつぎのような動作をして ON、OFF を繰り返すようになります。

○点 a……AK間に順方向電圧がかかっているので、ゲート・トリガ電圧がかかると SCR は(ア) になる。

(ア) ON

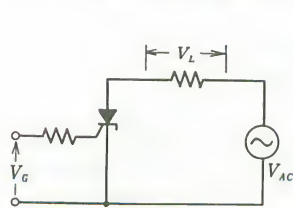
○点 b…… $V_{AC}$  が約 0 [V] となり、 $I_A$  が保持電流値以下となって、SCR は(イ) となる。

(イ) OFF

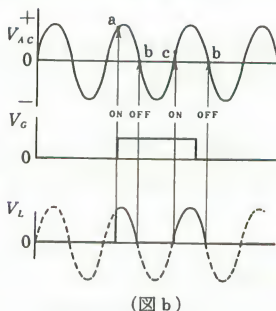
○点 c……ゲート・トリガ電圧はかかっているのに、AK間に順方向電圧が加わり始めると SCR は(ウ) となる。

(ウ) ON

そして、負荷に加わる電圧 ( $V_L$ ) は図のようになります。



(図 a)



(図 b)

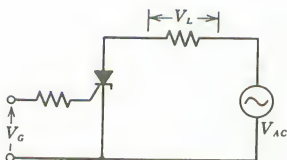
「答 あってましたか？」

OK, OK!

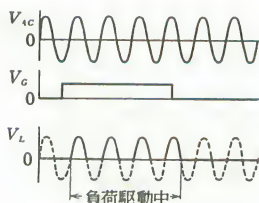
40 つまり、図 a の回路にゲート・トリガ電圧  $V_G$  を加えると、負荷に加わる電圧  $V_L$  は図 b のようになって、ゲート・トリガ電圧  $V_G$  を加えている間は、負荷に交流電圧の半波分が加わるようになります。

そして、交流電圧の半波分とはいえ、ゲート電圧がかかっている間は負荷に電圧が加わり、負荷が駆動できるわけです。

すなわち、ゲート電圧によって、負荷を駆動したり、しなかったりという ON-OFF 制御ができるわけです。



(図 a)



(図 b)

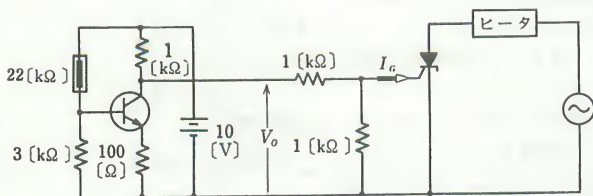
フン フン

半波だけど

電圧がかかるとのことには

違いがないからな

41 図の回路は、サーミスタで温度を検出し、SCRを用いてヒータを制御するという温度制御回路です。



- (1) 温度が低くなり、出力電圧  $V_o$  が上昇してきて、 $I_g$  がゲート・トリガ電流値以上になると、SCRは \_\_\_\_\_ となり、ヒータを駆動します。
- (2) また、温度が上昇し、出力電圧  $V_o$  が低下して、 $I_g$  がゲート・トリガ電流値以下になれば、SCRはOFFとなってヒータは働かなくなります。

でも ヒータにかかる電圧は、半分分けてでしょ

「そう いう こと」

ON

「たとえば、  
100[W]のヒータを用いると、  
およそ 50[W]のヒータとして、  
働くわけですね」

42 また、図の回路は前章で学習したシュミット・トリガ回路を利用して、ある任意の温度  $T_1$  以上になれば出力  $V_o$  をHにしてSCRをONにし、また、ある任意の温度  $T_2$  以下になれば出力  $V_o$  をLにしてSCRをOFFにするという温度制御回路の一例です。

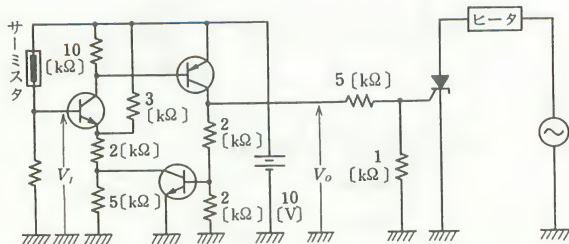
これまで学習してきたことをふり返りながら、この回路の動作を順次、考えてみてください。

- (1) この回路では  $V_i$  が何ボルト以上になると  $V_o$  が約10[V]になりますか。  
また、 $V_i$  が何ボルト以下になると  $V_o$  が約0[V] になりますか。
- (2)  $V_o$  が約 10 [V] になったとき、ヒータにかかる電圧はどのようにになりますか。

Hは高い電圧。  
Lは低い電圧のこと  
でいいね

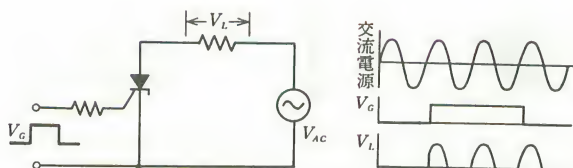
「そうですね」

- (1)  $V_i = 7.7[V]$   
 $V_i = 4.7[V]$
- (2) 交流半波



43 いままでの学習で、SCRとはどのような動作をするものか、またSCRを用いてON-OFF制御するにはどうすればよいのかということを考えてきました。

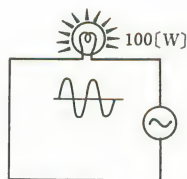
ところで、いままでも学習してきたSCRは、電源に交流電圧を用いることができるとはいつても、ゲート・トリガ電流 $I_g$ を流してONの状態にできるのは、交流電圧の\_\_\_\_\_の期間だけです。半波



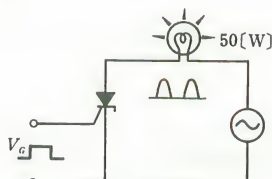
ウーン  
半波だけでなく、全波が  
使えらもつむ。  
ほいなあー  
「もうケレ 待つて下さい」

44 そのため、負荷にかかる電圧は交流の正の半波だけになり、最高の通電状態でも、通常の交流電圧を加えているときの半分の消費電力になります。

つまり、100 [W] のランプを点灯しているときでも、その明るさはおおよそ\_\_\_\_\_ [W] にしかありません。



(図 a)



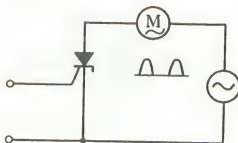
(図 b)

50

フン フレ  
加わら電圧が  
半分だからですね  
「そう いう こと」

45 また、負荷にかかる電圧の方向も正の方向だけのもので、正負の電圧の両方ばかりりません。

したがって、たとえば交流モータのように交流でなければ動作しないような負荷は、駆動することができません。



フン フン

46 これに対して、交流の正負いずれの場合でもONの状態にできるようにしたものに、トライアックと呼ばれるものがあります。  
それでは次に、このトライアックについて学習していきましょう。

#### 47 トライアック

トライアック (TRIAC) とは、Triode AC Switch の略で、SCRと同じく図のように3本の端子をもつスイッチング素子です。



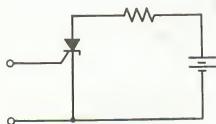
「Triodeとは3極、  
ACとは交流、という  
意味ですよ」

フーン

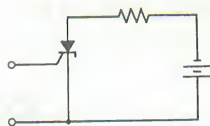
3極、交流、スイッチの  
意味があるんですね

48 SCRの場合は、図 a のような向きに電圧がかかっているときにGK間にゲート・トリガ電圧を加えることによって \_\_\_\_\_ にすることができました。

しかし、図 b のように電圧がかかっているときは、ONの状態にすることはできません。



(図 a)



(図 b)

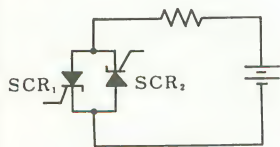
ON

「SCRの動作  
覚えてますね」

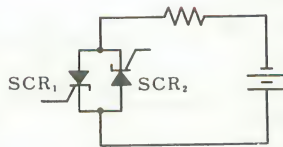
バッテリー

49 では、図のようにSCRを並列接続するとどうでしょう。

図 a のように電圧がかかっているときはSCR<sub>1</sub>に順方向電圧が加わり、図 b のように電圧がかかっているときは \_\_\_\_\_ に順方向電圧が加わるようになります。



(図 a)



(図 b)

SCR<sub>2</sub>

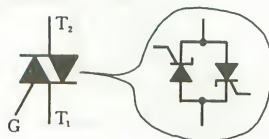
ナレホド  
二つをペアにして使ってた  
ことですね。

「まあーネ  
問題があるけど  
このように考えると  
覚えてやすいヨ」



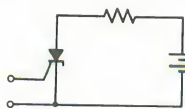
50 トライアックは、概略的には SCR を 2 個用いて両方向（双方向）性をもたせたものです。

したがって、図記号も 2 個の SCR をペアにしたようなもので示し、それぞれの電極を  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $G$  端子と呼んでいます。

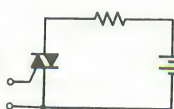


感がでてるでしょ

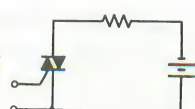
51 SCR は図 a のような方向に電圧を加えないと ON にすることができませんが、トライアックは二つの SCR を互いに逆方向に接続したようなものですから、図 b や図 c のように、どちらの方向に電圧を加えても ON にすることができます。



(図 a)



(図 b)

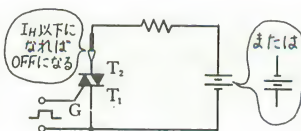


(図 c)

「図記号を見て  
両方向に  
電流が流れることが  
わかりますネ」

52 そして、トライアックが OFF になるのは、SCR と同じように  $T_1T_2$  間を流れている電流が保持電流値以下になったときです。

すなわち、トライアックは  $T_1T_2$  間に任意の方向に電圧をかけておいて、 $GT_1$  間にゲート・トリガ電圧を加えれば、  
(ア) にかけることができます。



き、 $T_1T_2$  間に流れている電流を保持電流値以下にすれば (イ) になるわけです。

(ア) ON  
(イ) OFF

53 トライアックを ON にするためのゲート・トリガ電圧の値や、ゲート・トリガ電流の値、および保持電流の値は、それぞれ SCR のときと同様にカタログに明記されています。

つぎの数値は、2SM151 と呼ばれているトライアックの特性値です。

2SM151

ゲート・トリガ電圧	2 [V]
ゲート・トリガ電流	30 [mA]
保持電流	7 [mA]

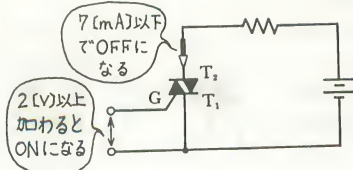
「トライアックの場合は、  
2S...の次のアルファベット  
が、M になっています」

## 54 すなわち、2SM151

の場合は $G, T_1$ 間に2[V]  
以上の電圧がかかると  
ONになり、 $T_1, T_2$ 間に流  
れる電流が\_\_\_\_\_  
[mA]以下になると  
OFFになるわけです。

## 2SM151

ゲート・トリガ電圧	2[V]
ゲート・トリガ電流	30[mA]
保 持 電 流	7[mA]



7

$I_{G}$ が30[mA]以上流れる  
必要もあるわけでは

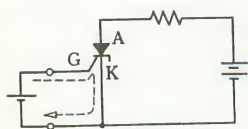
「 $G, T_1$ 間に2[V]以上  
加えると、必ず30[mA]  
以上流れるわけです。」

55 ところで、トライアックは単に2個のSCRを並列に接続した  
だけではなく、もう一つおもしろい特性をもっています。

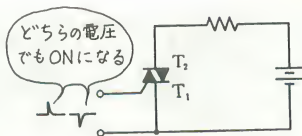
それは、トライアックをONにするために加えるゲート・トリガ  
電圧です。

SCRの場合は、図aのように(ア) \_\_\_\_\_ から(イ) \_\_\_\_\_ の方向  
に電流が流れるような向きに電圧を加える必要がありました。

ところが、トライアックの場合はゲート部分がすこしくふうされ  
ていて、加える電圧の極性はどちらでもかまわないのです。



(図 a)



(図 b)

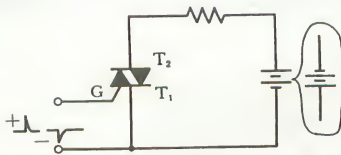
(ア) G (イ) K

オヤ オヤ  
極性は ないのですか

「そういふこと」

56 すなわち、トライアックは $T_1, T_2$ 間に電圧がかかっていさえすれ  
ば、あとは正負いずれの方向でもゲート・トリガ電圧を加えること  
によってONにすることができます。

たとえば、さきほど例  
にあげた2SM151なら  
ば、\_\_\_\_\_ [V]以  
上のゲート・トリガ電圧  
を加えると、電圧の方向  
に無関係にONにするこ  
とができるわけです。

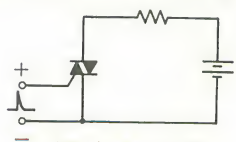


トライアックは  
何でも いいですね

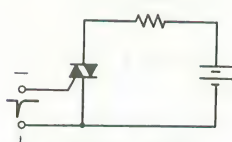
「そうです  
トライアックは  
寛容なのです」

2

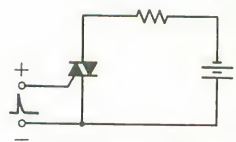
57 このようなことから、トライアックは具体的にはつぎの四つの状態のいずれでもONになります。



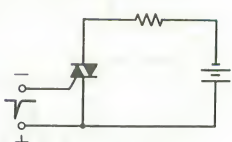
(図a) モード(I)



(図b) モード(II)



(図c) モード(III)



(図d) モード(IV)

しかし、このうちの図cの状態(モードIII)は、感度の点ですこし不安定さがあります。

つまり、 $T_2$ 側に負の電源電圧を加え、G端子に正のゲート・トリガ電圧を加えた場合は、通常のゲート・トリガ電圧の値では動作しない場合があります。

フーン

やはり トライアックにも

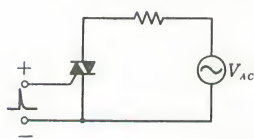
好き嫌いがあるのか

あってことか

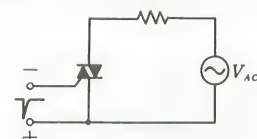
「何でも 可能は

むづかしいもつですね」

58 このような理由から、図のように交流電源を用いるときには、図aのようにすると前フレームのモード(I)の状態とモード(III)の状態を使うことになるので、一般にはこれを図bのように改めて、G端子に負の電圧がかかるようにして、前フレームのモード(II)、モード(IV)の状態で作動させるようにしています。



(図a)

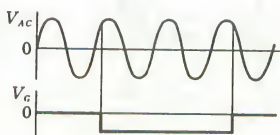
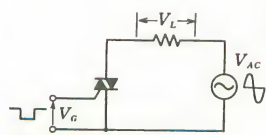


(図b)

ナルホド

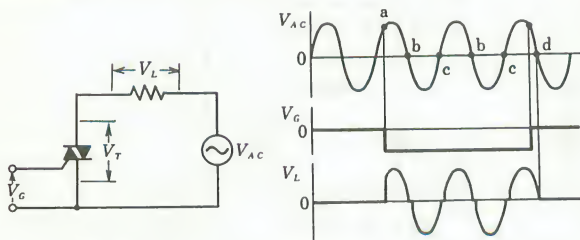
フン フン

59 それでは、図のように $T_1$ 、 $T_2$ 間に交流電源と負荷を接続し、図のようなゲート・トリガ電圧を加えたときの動作を考えてみましょう。



60 トライアックは $T_1T_2$ 間に電圧がかかり、 $V_G$ が加えられると、 $T_1T_2$ 間がONとなって、正負いずれの電圧も負荷にかかるようになります。

そして、保持電流値以下になるとOFFになりますから、つぎのような動作をすることになります。



○点a…… $V_{Ac}$ がかかっており、 $V_G$ が加わるため、トライアックは(ア) となる。

(ア) ON

○点b…… $V_{Ac}$ が0となり、保持電流以下となって、OFFとなるが、 $V_G$ が加わっているため、 $V_{Ac}$ がかかり始めるとすぐにまた(イ) となる。

(イ) ON

○点c……点bと同じ。

○点d……保持電流値以下となり、(ウ) となる。

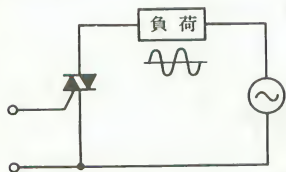
(ウ) OFF

61 このようにトライアックは、SCRと違って、ゲート・トリガ電圧を加えると負荷にはほとんど交流電圧そのものが加わるようになります。

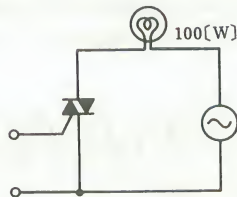
したがって、トライアックを用いると、図aのように交流で働く負荷を自由に駆動することができるわけです。

また、消費電力も定格値どりの動作をさせることができるわけです。

図bのように100[W]のランプであれば、その消費電力も100[W]になります。



(図a)



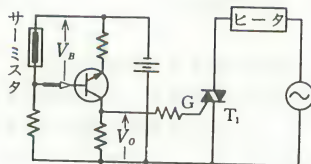
(図b)

フン フン  
これは  
便利だナァー



62 図の回路は、サーミスタからの検出電圧をトランジスタで増幅し、その出力でトライアックを駆動してヒータを制御しようとした温度制御回路です。

図の回路でNPNトランジスタを負の電源で動作させているのは、ゲート・トリガ電圧がトライアックの $T_1$ 端子に対して負の電圧に加わるようにするためです。



この回路は、温度変化に応じてつぎのように動作します。

○温度上昇→ $V_B$  減少→ $I_B$  (ア) →  $V_o$  減少  
↓  
トライアック (イ)

(ア) 減少

(イ) OFF

○温度低下→ $V_B$  増加→ $I_B$  (ウ) →  $V_o$  増加  
↓  
トライアック (エ)

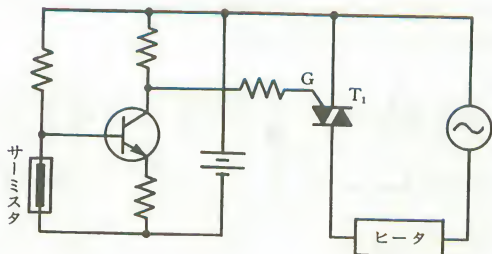
(ウ) 増加

(エ) ON

63 電源電圧が負になっているのが扱いにくければ、この回路の上下を逆にして、図のようにかきなおすとわかりやすいかもしれません。

このような回路図のかき方をする場合もよくありますから、覚えておいてください。

いずれにしても、 $T_1$ 端子に対してG端子が負になるようなゲート・トリガ電圧を加えるために、このような回路構成にしているわけです。



「これで SCR と  
トライアック の差を  
分ります。  
ちょっと、休息(し)ましよう。  
ご苦労さんでした。」



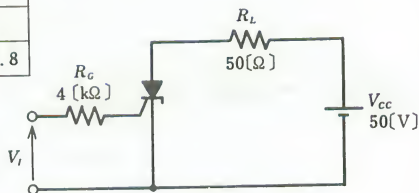
## 練習問題

1 つぎの文章の \_\_\_\_\_ の中に適する言葉を入れ、文章を完成しなさい。

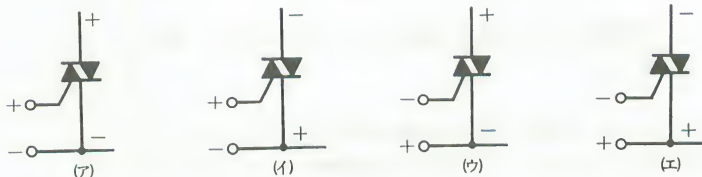
- (1) SCRはA, K, Gと略される3本の端子をもった半導体スイッチング素子で、Aの電極をアノード、Kの電極を(ア) \_\_\_\_\_, Gの電極を(イ) \_\_\_\_\_ といいます。
- (2) SCRでスイッチの接点の働きをする電極は(ア) \_\_\_\_\_ - (イ) \_\_\_\_\_ 間です。
- (3) SCRをONにするために必要なゲート電圧の値を(ア) \_\_\_\_\_ 電圧といい、ONになったのちに、アノードを流れる電流を減少してきて、もとのOFF状態にもどるときの電流の限界値を(イ) \_\_\_\_\_ 電流といいます。

2 つぎのような特性をもつSCRを用いて図のような回路をつくったとき、SCRを確実にONにするための入力電圧 ( $V_i$ ) の最低値はいくらになりますか。

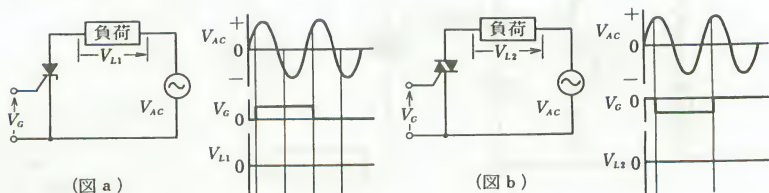
	min.	typ.	max.
ゲート・トリガ電流[mA]	—	0.6	1
ゲート・トリガ電圧[V]	0.2	0.6	0.8



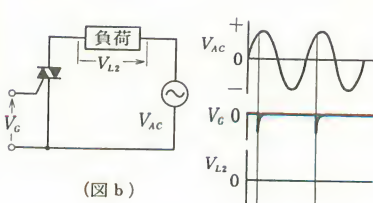
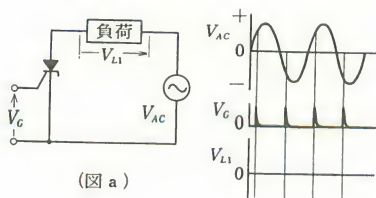
3 つぎの図は、トライアックをONにするときの四つの状態を示したものです。感度に不安定さがあるのはどれですか。



4 図aや図bの回路につぎのようなゲート・トリガ電圧  $V_G$  を加えたとき、負荷に加わる電圧  $V_{L1}$ ,  $V_{L2}$  はそれぞれどのようなになりますか。



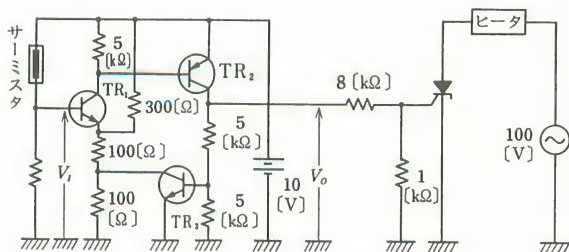
- 5 図 a や図 b の回路につぎのようなゲート・トリガ電圧  $V_G$  を加えたとき、負荷に加わる電圧  $V_{L1}$ 、 $V_{L2}$  はそれぞれどのようなになりますか。



- 6 図の回路はサーミスタで温度を検出し、ヒータを ON-OFF 制御するための回路です。

つぎの問いに答えなさい。

- (1)  $TR_1$ 、 $TR_2$ 、 $TR_3$  の回路はなんという回路ですか。



- (2)  $V_i$  が何ボルト以上になればヒータが駆動されますか。

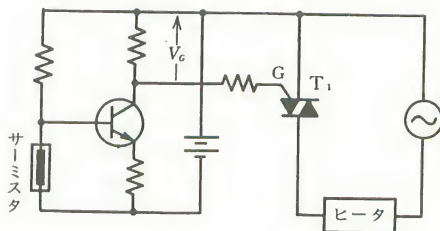
- (3) 100 [W] のヒータを用いたとき、この回路では実質的に何ワットのヒータとして働きますか。

- 7 図の回路はトライアックを用いた温度制御回路です。

つぎの問いに答えなさい。

- (1) トライアックの G 端子には  $T_1$  端子に対してどのような極性の電圧が加わりますか。

- (2) 温度が上昇すると、 $V_G$  の値はどのようなになりますか。



- (3) 温度が上昇すると、ヒータはどのようなになりますか。



# 7. 位 相 制 御 (I)

## 学 習 の 目 標

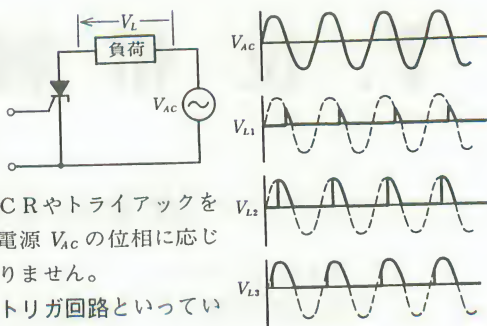
1. SCRやトライアックを用いて、負荷を連続的に制御できる位相制御について学習する。
  - (1) 位相制御とはどのようなものか。
  - (2) どのようにして負荷を連続的に制御できるのか。
2. SCRやトライアックに位相制御動作をさせるために必要なUJT (ユニジャンクション・トランジスタ) について学習する。
  - (1) UJTとはどのようなものか。
  - (2) どのように活用すればよいのか。
3. UJTを用いた位相制御回路について学習する。



## 学習の概要

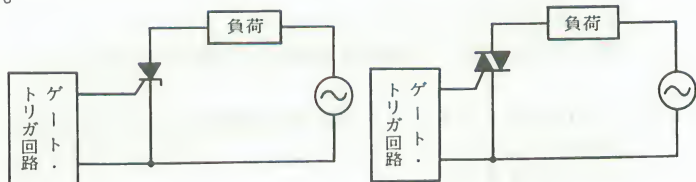
### 1. 位相制御

- (1) 位相制御とは、図のように負荷に加える交流電圧の位相角を変化して、負荷に供給する電力を連続的に制御する方法です。



- (2) 位相制御を行うためにはSCRやトライアックをONにするタイミングを交流電源  $V_{Ac}$  の位相に応じて任意に変化できなければなりません。

そのための回路をゲート・トリガ回路といいます。



- (3) ゲート・トリガ回路には、一般につぎのような半導体素子が利用されています。



UJT



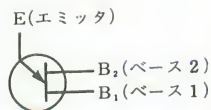
PUT



ダイアック

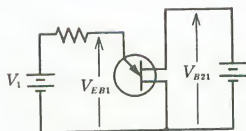
### 2. UJT (ユニジャンクション・トランジスタ)

- (1) UJTとは  $B_1$  (ベース1),  $B_2$  (ベース2), E (エミッタ) という3本の電極をもち、図aのような図記号で示されるものです。



(図a) UJTの図記号

- (2) UJTは図bのように  $B_1B_2$  間に電圧  $V_{B21}$  を加えておき、 $V_i$  を増加していくと、 $V_{B21}$  の値に対して  $V_{EB1}$  がある値に達したとき  $EB_1$  間がONの状態になります。



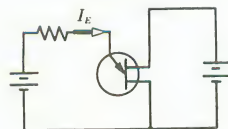
(図b)

- (3) ここで、 $V_{B21}$  に対して  $V_{EB1}$  がいくらになったときに  $EB_1$  間がONになるかという割合 ( $V_{EB1} / V_{B21}$ ) をスタンオフ電圧比といいます。

一般にこの値は50[%]程度になっています。

- (4)  $EB_1$  間がONの状態になったのち、もとのOFF状態にもどるのは、エミッタ端子に流れている電流 ( $I_E$ ) がある値以下になったときです。

この電流値のことを谷電流といいます。

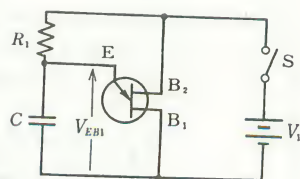


(図c)



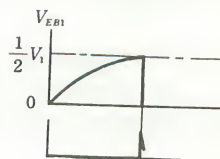
### 3. UJTによるトリガ・パルス発生回路

UJTを用いて図 a のような回路を構成し、スイッチ S を入れると、つぎのような動作をするようになります。



(図 a)

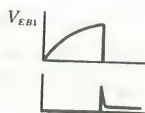
- ① スイッチ S を入れると  $B_2B_1$  間には電圧  $V_1$  が加わり、 $V_{EB1}$  はコンデンサ C が充電されるに従って、図 b のように上昇していきます（上昇していく速度は C と  $R_1$  との積で決まり、 $CR_1$  の値が大きいほど上昇する速度は遅くなります）。



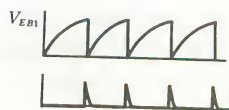
(図 b)

- ②  $V_{EB1}$  がほぼ  $V_1 / 2$  の値まで上昇すると  $EB_1$  間が ON となり、コンデンサに蓄えられた電荷が急激に放電します。

- ③ 放電が終わると  $EB_1$  間を流れる電流はほぼ  $V_1 / R_1$  となりますが、この値が谷電流値より大きければ図 c のように ON を持続し、谷電流値よりも小さければ図 d のように発振するようになります。



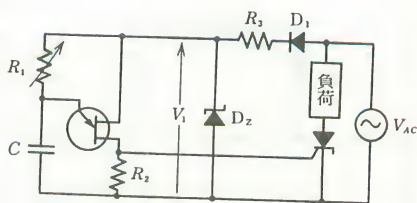
(図 c)



(図 d)

### 4. UJTを用いたSCRのゲート・トリガ回路

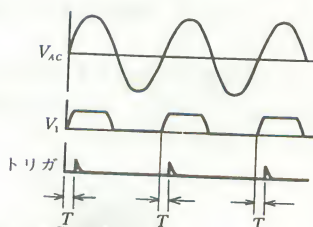
UJTを用いて図のような回路を構成すると、 $R_1$  の値を変化させることによって位相制御を行うことができます。



- ① UJT回路に加わる電圧  $V_1$  は、 $D_1$ 、 $R_3$ 、 $D_2$  によって図のようになります。

- ② UJTに  $V_1$  が加わることによって図のようなトリガ・パルスが UJT から出力されます。

- ③ 電圧  $V_1$  が加わってからトリガ・パルスが出力されるまでの時間  $T$  は  $R_1$  によって変化でき、SCR を ON にする位相を任意に制御できます。



- $R_1$  が大きい  $\Rightarrow$  時間  $T$  が長い  $\Rightarrow$  負荷に加わる電力は小さい。
- $R_1$  が小さい  $\Rightarrow$  時間  $T$  が短い  $\Rightarrow$  負荷に加わる電力は大きい。

## 学習の展開

1 前章では、SCR やトライアックの基本動作を知り、その応用として、負荷をON-OFF制御する方法について学習してきました。

しかし、いままでに学んできた ON-OFF 制御は、負荷を駆動したりしなかったりという制御はできましたが、たとえばランプの明るさを自由自在にコントロールするというような制御はできません。

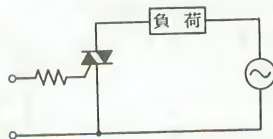
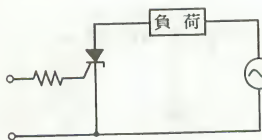
ところが、この方法にちょっとした工夫をすると、単にランプを点灯したりしなかったりという動作だけでなく、ランプの明るさを連続的に制御することができるようになります。

ホー  
ランプの明るさを  
連続的にですか？

「そうですヨ」

2 図の回路は、SCR やトライアックを用いた ON-OFF 制御回路ですが、この回路を応用すると、単に負荷を駆動したりしなかったりという制御でなく、負荷に与える電力を連続的に制御できるようになります。

これから学ぶこのような制御方法を、いままでの ON-OFF 制御と区別して、一般に位相制御といっています。

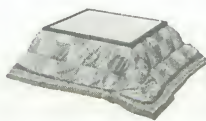
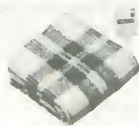


なぜ 位相制御と  
いうのかな？

「まだ もう少し  
待って下さい！」

3 最近の家庭電化製品をみても、電気スタンドなどは単に切り換えるだけでなく、連続的に明るさを調整できるようになったものがあります。

また電気毛布や電気コタツなどでも、単にヒータを ON, OFF 動作させるのではなく、ヒータでの発熱量を連続的に調整できるようになったものがあります。



これらはすべて、これから学習する位相制御を応用したものです。

フレ フレ  
これは おもしろく  
なりそうだな

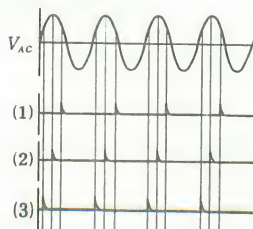
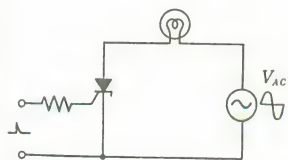
4 それでは、前章の学習を基礎にして、この章では負荷を連続的に制御できるという位相制御について学習していきましょう。



ハーイ  
ようしく  
お願いします

5 まず、ランプの明るさを制御する場合を例にとりて、位相制御とはどのようなものかということから学習していきましょう。

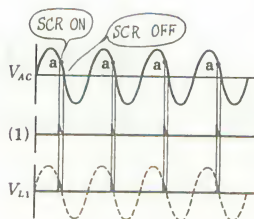
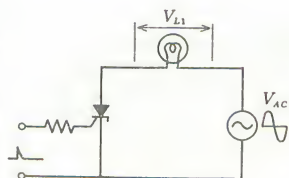
図の回路は、いままでの ON-OFF 制御回路と同じものですが、この SCR のゲート端子につぎの (1)~(3) のようなトリガ・パルスを加えるとどうなるでしょうか。



「パルスとは  
脈流のこと、  
脈拍のように、  
間欠的な電圧のことを  
いいます。」

6 (1) のトリガ・パルスを加えた場合は、電源  $V_{AC}$  の波形中のそれぞれ点 a のところで SCR が ON となり、その後 0 [V] と交差するところで \_\_\_\_\_ になります。

したがって、ランプに加わる電圧  $V_{L1}$  は、図のように点 a から 0 [V] と交差するまでの位相分になります。



OFF

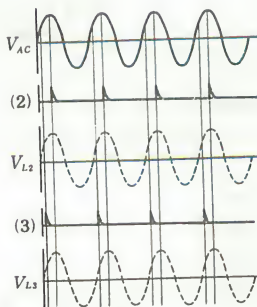
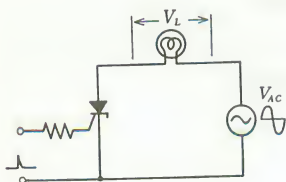
アレ アレ

ラレアに加わる電圧は  
ごくわずかなア

「そうでしょ」

7 それでは、同じように(2), (3)のトリガ・パルスを加えると、ランプに加わる電圧はどのようなになるでしょうか。

(2)が加わった場合にランプに加わる電圧の波形を図の  $V_{L2}$  のところに、また(3)が加わった場合を図の  $V_{L3}$  のところに、それぞれ記入してください。



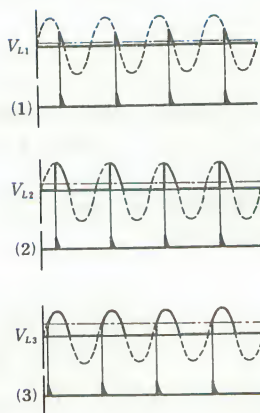
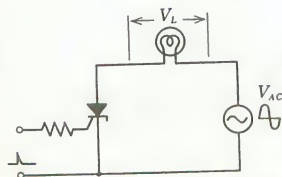
フン フレ  
ランプに加わる電圧が、  
大きく なってきたぞ

「答は次フレームを  
参照して下さい」

8 負荷に加わる電圧  $V_L$  は、それぞれどのようなになりましたか。

トリガ・パルスによって SCR を ON にする位置を変化させると、ランプに加わる電圧は図のようになりましたね。

さて、ランプにこのような電圧がかかると、ランプの明るさはどのようなになるのでしょうか。



「トリガパルスの  
タイミング(位置)で、  
ランプに 加わる電圧が  
ずいぶん ちがって  
くるでしょ」

なー うほど

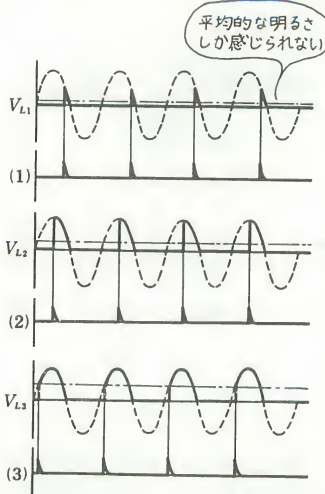


9 ランプに加わる電圧は、それぞれ時間的に断続を繰り返しているのですが、これらは1秒間に何十回という非常に速い速度で断続しています。

そのため、私たちの目には、この断続は感じられません。

私たちの目には、図のようにランプが発光する平均的な明るさが感じられるだけです。

したがって、いまの場合は、最も少ない電圧しかかからないトリガ・パルス(1)のときが最もランプは(ア)く、(2)の場合、(3)の場合と徐々に(イ)くっていきます。



(ア) 暗 (イ) 明る

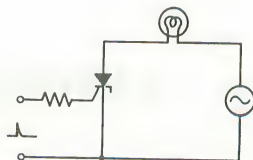
ナールホド

「このところの  
位相制御の  
ポイントだよ」

10 つまり、SCR を ON にするタイミングをうまく制御すれば、実質的にはランプの明るさを連続的に変化させることができるわけです。

このことは、ランプに限ったことではありません。

負荷にヒータを接続した場合でも、モータを接続した場合でも、うまく連続的な動作をさせることができます。

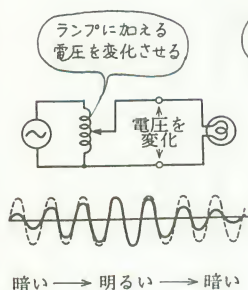


でも ON にする  
タイミングは  
どうするのかな？

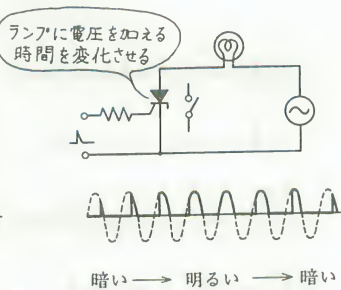
「あとの おたのしみ」



11 一般に、負荷を制御するといえば、図 a のように負荷に加える電圧の振幅を変化させる方法を考えますが、図 b のようにスイッチング素子を用いて、一つの正弦波単位で ON にする時間をコントロールする方法によっても負荷を制御することができるわけです。



(図 a)



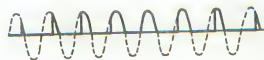
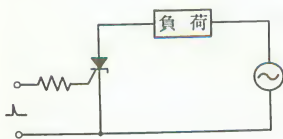
(図 b)

おもしろい発想だねアー

「何事も工夫が第一ですよ」

12 このようにスイッチング素子を用いて、電源の正弦波交流中の任意の期間だけ負荷に電圧を加えるようにし、負荷を連続的に制御する方法を、SCR を ON にする位相を制御するという意味で位相制御といっているのです。

この方法は基本的には、スイッチの ON-OFF 機能を利用した一種の ON-OFF 制御なのですが、単に負荷を駆動したり、しなかったりという制御ではありませんから、従来の ON-OFF 制御と区別して\_\_\_\_\_といっているわけです。



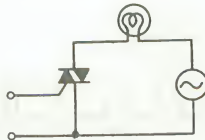
位相制御

ナールホド  
ON にする位相を  
制御するから 位相制御か

「そういふこと」

13 さて、位相制御については、これまで SCR を例に考えてきましたが、トライアックの場合でも同じことです。

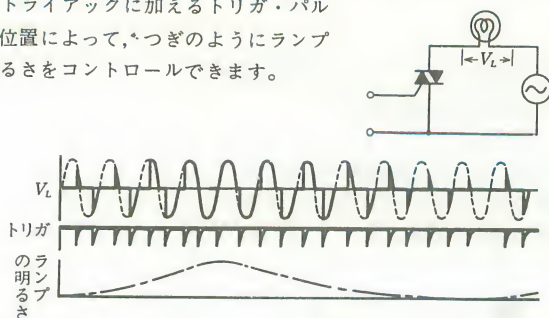
つまり、トライアックを ON にするタイミングをうまく制御すればいいわけです。



フル フン  
ポイントとは  
タイミングということか

「そういふこと」

14 トライアックに加えるトリガ・パルスの位置によって、\*つぎのようにランプの明るさをコントロールできます。

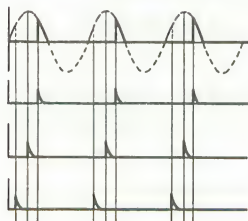
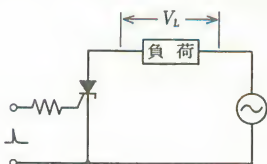


オヤ オヤ  
この場合は 交流の正負共  
制御できるわけだ

15 以上で、スイッチング素子を用いて負荷を制御するという意味がわかり、さらに位相制御についておよその理解ができたと思います。

位相制御とは、SCR やトライアックを ON にするタイミングをうまくコントロールして負荷を制御する方法です。

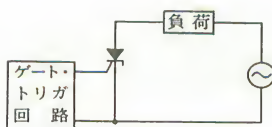
ところで、このように SCR やトライアックに位相制御動作をさせるためのトリガ・パルスはどのようにして得られるのでしょうか。



さあ  
ここからが 問題だ

「トリガパルスがなければ、  
位相制御は  
できません」

16 このような SCR やトライアックを任意のタイミングで ON にするためのトリガ・パルスを発生する回路を総称してゲート・トリガ回路といいます。



トリガをかけるための  
ゲート回路、ということかな

「ホー  
うまく いうネー」

17 それでは、いよいよ SCR やトライアックに位相制御動作を行わせるためのゲート・トリガ回路について、具体的に学習していきましょう。

よろしく  
お願いします

## 18 ゲート・トリガ回路

ゲート・トリガ回路とは、SCR やトライアックに位相制御動作をさせるためのトリガ・パルスを発生させる回路です。

トリガ・パルスを発生するにはいろいろな方法がありますが、一般に行われているのは、つぎのような UJT や PUT、ダイアックと呼ばれている半導体素子を用いる方法です。



UJT



PUT



ダイアック

これらの半導体素子のことを一般にゲート・トリガ素子といっています。

いろいろ あるんだナア

「まあーネ」

19 本書でも、このような半導体素子を利用してトリガ・パルスを発生させる方法を学習していきたいと思います。

そこでまず、これらの素子の中から UJT を取りあげ、その基本動作と、どのようにしてトリガ・パルスを発生させるのかを学習していきましょう。

ヨーシ！  
本んばうなくちや

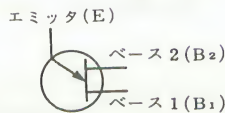
## 20 UJT

UJT とは、ユニジャンクション・トランジスタ (Unijunction Transistor) の略で、図 a のように 3 本の端子をもつ半導体素子です。

そして、それぞれの電極をベース 1 ( $B_1$ )、ベース 2 ( $B_2$ )、エミッタ (E) といい、図 b のような図記号を用います。



(図 a) UJT の外観



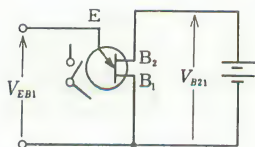
(図 b) UJT の図記号

「ユニジャンクション  
トランジスタとは  
単接合トランジスタ  
という 意味ですよ」

おもしろい  
図記号 ナナー

21 それでは、この UJT がどのような動作をするのかをみていきましょう。

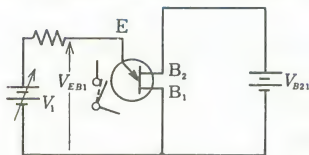
UJT は、図のように  $B_1B_2$  間に電圧を加えておき、 $EB_1$  間の電圧を上昇していくと、ある電圧値に達したとき  $EB_1$  間が ON になるというスイッチング素子です。



$E \cdot B_1$  間が、接点の動きをするわけか

「そう いう こと」

22 したがって、 $B_1B_2$  間に図のように電圧  $V_{B21}$  を加えておき、 $V_1$  を増加して  $V_{EB1}$  を増加していくと、ある電圧値に達したとき  $EB_1$  間が \_\_\_\_\_ の状態になります。



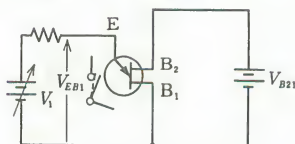
ON

23 ここで  $EB_1$  間が ON になるときの  $EB_1$  間電圧は、 $B_1B_2$  間に加えた電圧  $V_{B21}$  に関係しており、およそ  $V_{B21}$  の  $\frac{1}{2}$  の値です。

正確には  $V_{B21}$  の値に対して、どの程度の  $V_{EB1}$  で ON になるかという比率をスタンドオフ電圧比といいます。この値はカタログに明記されています。

つぎの値は 2SH11 という UJT のスタンドオフ電圧値です。

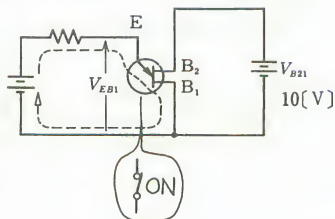
スタンドオフ電圧比	0.55
-----------	------



「UJT の品番は一般に 2S の次のアルファベットが、H になっています 2SH ……」

本書では、以下の説明を簡単にするために、スタンドオフ電圧比を約  $1/2$  として取り扱っていきましょう。

24 UJT を用いた図のような回路では、 $V_{B21}$  の値が 10[V] ですから、 $V_{EB1}$  がおよそ \_\_\_\_\_ [V] 以上になれば  $EB_1$  間が ON になり、 $EB_1$  間に電流が流れます。



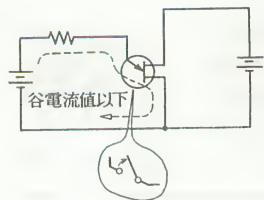
「スタンドオフ電圧比のポイントですヨ」

5



25 このようにして ON になったのち、こんど OFF になるのは、SCR やトライアックなどと同じように、 $EB_1$  間に流れている電流をある値以下にすればいいのです。

この電流のことを、SCR などの場合には保持電流といっていますが、このようなゲート・トリガ素子の場合は谷電流といっています。

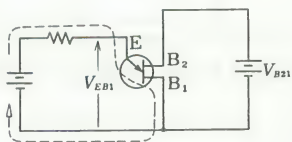


保持電流 = 谷電流と  
考えてもいいですね。

「まあーホ」

26 すなわち、UJT は SCR とほとんど同じ動作をするもので、 $EB_1$  間の電圧  $V_{EB1}$  が  $B_1B_2$  間に加えた電圧  $V_{B21}$  の約半の値になると  $EB_1$  間が(ア)

の状態になり、その後、 $EB_1$  間に流れる電流が谷電流値以下になると  $EB_1$  間がもとの(イ)の状態にもどるという働きをする半導体素子です。

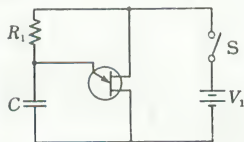


(ア) ON

(イ) OFF

27 それでは、このような動作をする UJT を利用してトリガ・パルスを発生させるには、どうすればよいのかを考えてみましょう。

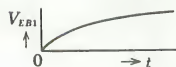
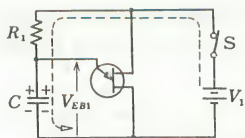
図のような回路でスイッチ S を ON にするとどうなるでしょうか。



「スタレドオフ電圧器と  
谷電流が ポイント  
ですよ」

28 スイッチ S を ON にすると、 $B_1B_2$  間に電源電圧  $V_1$  が加わります。

一方、抵抗  $R_1$  を通してコンデンサ C が充電されますから、この充電量にともなう  $V_{EB1}$  が徐々に上昇していきます。

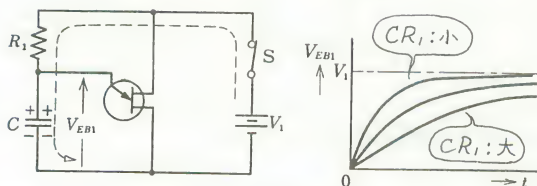


「コレクタは、電気を  
蓄えるアンプのような  
もので、  
電流を流し込むと、  
水位が上昇するように、  
コレクタ両端の電圧  
( $V_{EB1}$ ) が上昇するんだヨ」



29 このコンデンサ  $C$  の両端の電圧 ( $V_{EB1}$ ) が上昇していく速さは、図のようにコンデンサの容量と抵抗の積  $CR_1$  の値によって決まります。

$CR_1$  の値が大きいほど遅く、また逆に小さいほど \_\_\_\_\_ 早く上昇していきます。

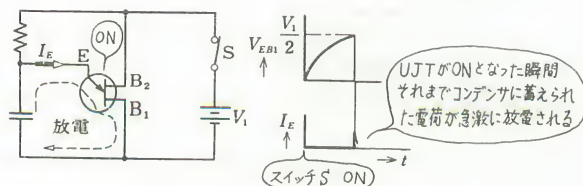


早

アレフが小さく  
水は弱いほど  
満タレにするには  
時間がかかっわけだ

「うまいこと ううねエ」

30 このようにして  $EB_1$  間の電圧が上昇していき、 $V_{EB1}$  が  $V_1$  の  $1/2$  程度まで上昇してくると、UJT は ON となって、いままでに充電されてきたコンデンサの電荷が急激に放電され、図のようになり大きな放電電流  $I_E$  が瞬間的に流れます。



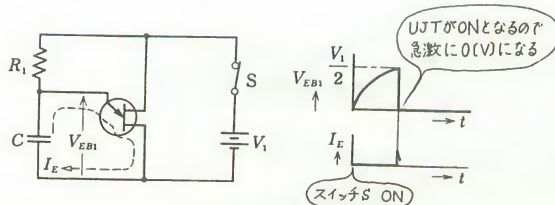
満タレになったアレフを  
ブツマケル わけだ

「そう、

水は 一気に  
流れ出すわけです」

31 すなわち、図のような回路でスイッチ  $S$  を ON にして電圧  $V_1$  を加えると、 $CR_1$  の値で定まる一定時間後に UJT が ON になり、かなり大きな値の放電電流が UJT の  $EB_1$  間に流れます。

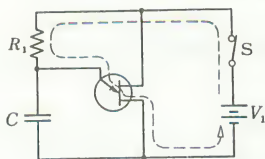
そして、コンデンサの電荷が放電されることによって、 $V_{EB1}$  も約  $0[V]$  になってしまいます。



フン フン  
タンフの中は  
空っぽ というわけア

32 さて、こうして一度 UJT が ON になった場合、それ以後の動作はどうなるでしょうか。

UJT が ON になってコンデンサの電荷が放電されてしまうと、コンデンサからの放電電流はなくなりますが、こんどは電源  $V_1$  からの  $V_1/R_1$  の値の電流が UJT に流れるようになります。

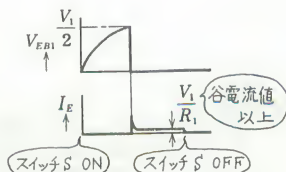
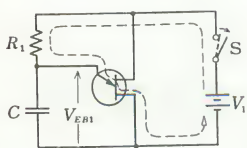


フン フン  
今までの充電電流が  
UJT に流れるわけだ。

33 この電流の値  $V_1/R_1$  が UJT の谷電流値以上であれば、UJT はそのまま (ア) \_\_\_\_\_ の状態を持続します。

ここではわかりやすくするために、谷電流値以上の電流が流れており、ON の状態が持続されていると考えておきましょう。

すると、スイッチ S を OFF にしたときに、UJT を流れる電流が谷電流値以下になりますから、UJT はもとの (イ) \_\_\_\_\_ の状態にもどるわけです。

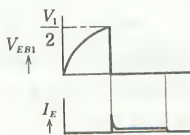
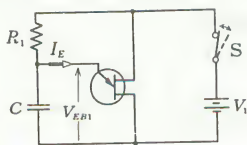


(ア) ON

(イ) OFF

ナルホド  
ナルホド

34 以上のことをまとめてみましょう。



「この回路動作は  
しっかり把握して  
下さいヨ」

ハーイ  
わかりました

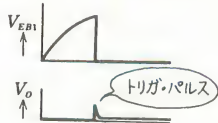
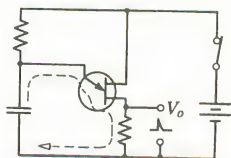
- ① スイッチ S を ON にすると電圧  $V_1$  が加わる。
- ②  $V_{EB1}$  が  $CR_1$  の値に応じて徐々に上昇し、 $V_1$  の値のほぼ 1/2 になったとき UJT が \_\_\_\_\_ となって急激な放電電流が流れる。
- ③ その後は  $V_1/R_1$  の電流が流れ続け、スイッチ S を OFF にした段階で谷電流値以下となり、もとの状態にもどる。

そして、再びスイッチ S を入ると①～③の動作を繰り返す。

ON

35 したがって、この回路の UJT の  $B_1$  のところに抵抗を入れておけば、放電電流がこの抵抗で電圧降下を起こしますから、図のようにトリガ・パルスが取り出せるようになります。

この抵抗には、一般に数十オーム程度のものが用いられます。

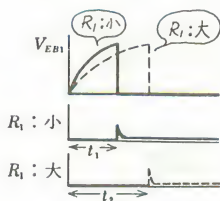
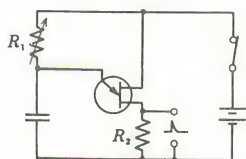


「さあ  
いよいよ  
トリガ・パルスの  
登場ですよ」

36 そして、図のように抵抗  $R_1$  を可変抵抗にしておけば、この  $R_1$  の値を増減させることによって、スイッチ  $S$  を ON にしてからトリガ・パルスが出るまでの時間を自由に変化できます。

$R_1$  を大きくすれば、コンデンサへの充電電流が少なくなって  $V_{EB1}$  が上昇するのが(ア) くなり、トリガ・パルスの発生が遅れます。

反対に  $R_1$  が小さいと、トリガ・パルスが(イ) くなります。



(ア) 遅

(イ) 早

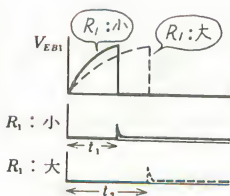
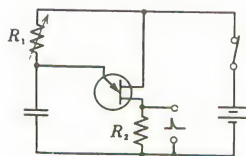
$R_1$  がトリガ・パルスを  
発生するまでの  
時間調整役って  
わけですね

「そういうこと」

37 つまり、UJT を用いて図のような回路を構成しておくと、抵抗  $R_1$  の値によってスイッチを ON にしてからトリガ・パルスが発生するまでの位置を自由に変化させることができるわけです。

○  $R_1$  が大きい  $\Rightarrow$  トリガ・パルスが(ア) 発生する。

○  $R_1$  が小さい  $\Rightarrow$  トリガ・パルスが(イ) 発生する。



(ア) 遅

(イ) 早

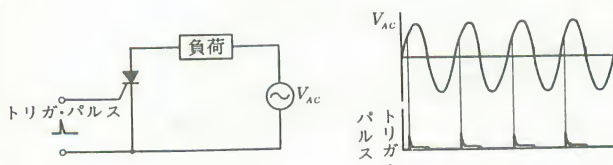
フン フン  
ナルホド

38 いままでの学習で UJT の動作の概要と、UJT を用いたトリガ・パルスの発生法が理解できたと思います。

ところで、SCR やトライアックに位相制御をかけるためには、単にトリガ・パルスが発生させるだけでは意味がありません。

負荷を駆動する交流電源の波形に対応させてトリガ・パルスが発生させる必要があります。

たとえば、図のように SCR を用いて負荷を位相制御するには、負荷に加える交流電源と同期させて、交流電圧の波形が 0 [V] から正に転じた一定時間後にトリガ・パルスが発生させなければなりません。



それでは次に、どのようにすれば交流電源と同期したトリガ・パルスが得られ、うまく位相制御がかけられるようになるのかを学習していきましょう。

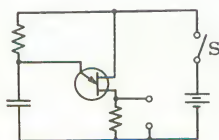
「いよいよ  
位相制御への  
応用法ですヨ」

ヨーシ  
ガレバルぞー

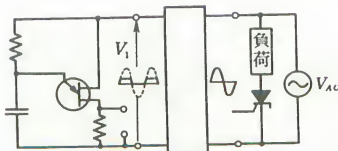
### 39 UJTによるゲート・トリガ回路

UJT を用いてトリガ・パルスが発生させる回路については、これまで図 a のようにスイッチ S を開閉させて動作させていました。

では、このようにスイッチを ON, OFF して直流電源を加える代わりに、図 b のように負荷を駆動する電源  $V_{AC}$  を整形した電圧  $V_1$  を加えるとどうなるでしょうか。



(図 a)

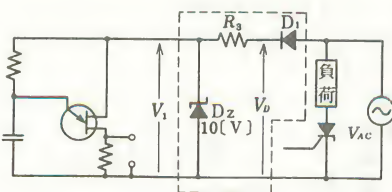


(図 b)

ウーン  
交流電圧を整形して  
加えたら  
どうなるんだろう



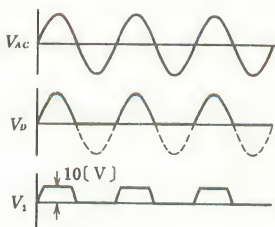
40 このような波形の整形は、図 a のようにダイオード  $D_1$ 、抵抗  $R_3$ 、ツェナ・ダイオード  $D_z$  を接続して行われます。



(図 a)

まず、交流電圧  $V_{Ac}$  はダイオード  $D_1$  で整流され、図 b の  $V_b$  のようになります。

この  $V_b$  をさらに抵抗  $R_3$  とツェナ・ダイオード  $D_z$  の回路に加えると、最大電圧がツェナ電圧（ツェナ・ダイオードに固有の電圧）におさえられるようになって、 $V_1$  には図のような出力が得られます。



(図 b)

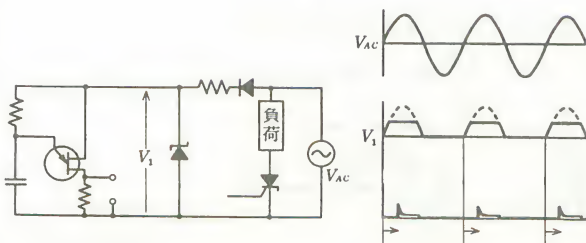
「ツェナ・ダイオード  
覚えてますか？」

「ツェナ電圧以上の電圧が、ツェナ・ダイオードに加わると、電流が流れて、 $R_3$  で電圧降下を起し、 $D_z$  両端の電圧はツェナ電圧に、おさえられるわけです」

41 では、このような電圧が UJT に加わると、UJT からトリガ・パルスはどのようになるでしょうか。

UJT 回路は、電圧が加わってから、 $C$  と  $R_1$  の値で定まる一定時間後にトリガ・パルスを出し、電圧が加わらなくなるともとの状態にもどります。

したがって、図のように、交流電源  $V_{Ac}$  からつくった電圧  $V_1$  が UJT 回路に加わると、UJT から、 $V_{Ac}$  の波形が 0 [V] を越えた位置から一定時間後に一つのパルスが出るようになります、うまく交流電源と同期したトリガ・パルスを発生するようになります。

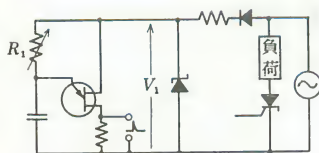


ナルホト  
交流電源を整形して  
UJT に加えるところ、  
電源と同期をとる  
ポイントだね

「そういうこと」



42 そして、抵抗 $R_1$ の値を小さくすれば、トリガ・パルスが出る位置が(ア) \_\_\_\_\_ くなり、 $R_1$ を大きくすれば、トリガ・パルスが出る位置が(イ) \_\_\_\_\_ になります。

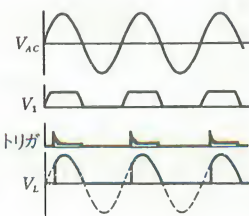
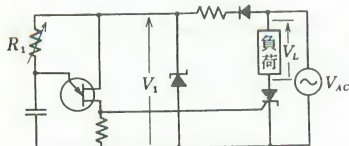


(ア) 早  
(イ) 遅

「どうです？  
電源に同期した  
トリガ・パルスが  
でてきたでしょ」

43 それでは、UJTのトリガ・パルス出力をSCRに接続してみましょう。

UJTからは、交流電圧 $V_{ac}$ が加わってから一定時間後にトリガ・パルスが出力されますから、そのタイミングでSCRがONとなり、負荷に電圧が加わるようになります。

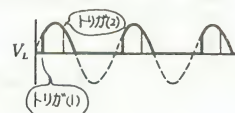
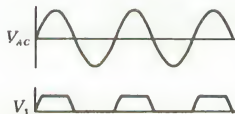
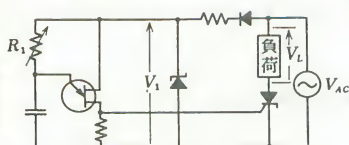


ナルホド  
これで タイミニアも  
OK アー

44 そして、抵抗 $R_1$ の値を変化させると、UJTからトリガ・パルスを出すタイミングが図のように変化し、負荷をうまく制御できるようになります。

○  $R_1$ の値を小さくする⇒トリガ(1)  
⇒負荷に加わる電力が(ア) \_\_\_\_\_ くなる。

○  $R_1$ の値を大きくする⇒トリガ(2)  
⇒負荷に加わる電力が(イ) \_\_\_\_\_ くなる。



(ア) 大き

(イ) 小さ

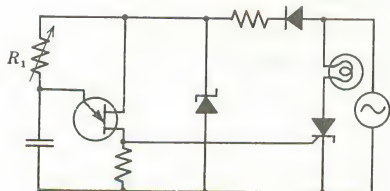
「位相制御回路の  
できあがり ですよ」

45 図の回路は、UJT を用いて SCR に位相制御をかけ、ランプの明るさを連続的に変化させるための回路です。

$R_1$  の値を変化させることによって、連続的にランプの明るさを変化できます。

○  $R_1$  の値を小さくする ⇒ ランプが(ア) くなる。

○  $R_1$  の値を大きくする ⇒ ランプが(イ) くなる。



(ア) 明る

(イ) 暗

「お好みの明るさに  
どうぞ」

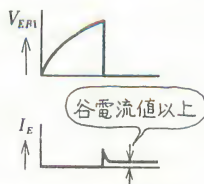
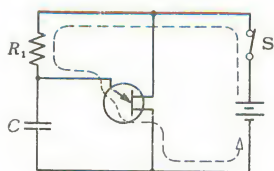
46 いままでの学習で、UJT とはどのような素子か、また UJT を用いてトリガ・パルスを発生させ、SCR やトライアックに位相制御をかけるにはどうすればよいのかといったことが理解できたと思います。

ところで、最後に一つだけ補足説明をしておかなければなりません。

「もうすれだから  
頑張って下さいヨ」

47 いままで学習してきた UJT の回路では、説明のついでで図のようにスイッチ S を入れて電圧を加えると、 $CR_1$  の値で定まる一定時間後に UJT は ON になり、その後はスイッチ S を OFF にしないかぎりそのまま ON の状態を持続するものとして取り扱ってきました。

つまり、UJT が ON になってコンデンサが放電したあとでも、UJT に谷電流以上の電流が流れ、\_\_\_\_\_ が持続すると考えてきました。



ON

ホー  
どうしてかなあー

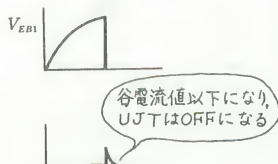
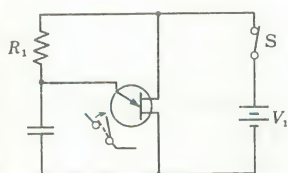
ところが、実際にはすこしちがった動作のさせ方をしています。  
つまり、実際には  $R_1$  の値を大きくして、UJT が ON になって放電電流が流れたあとは、谷電流値以下の電流になるようにしているのです。

「次のフレームへ  
どうぞ」

48 それでは最後に、このように ON になったのちに UJT を流れる電流が谷電流値以下になるように抵抗  $R_1$  の値を設定した場合、どのような動作をするか、また、こうすることによってどういう利点があるのかということを学習しておきましょう。

「この学習がすめば  
位相制御は  
完ぺきですよ！」

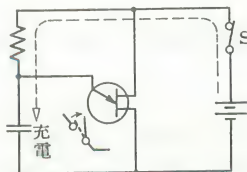
49 図の回路で  $V_1/R_1$  の値が谷電流値以下になるように抵抗  $R_1$  の値を選んでおくと、UJT が ON となった瞬間にはコンデンサの放電電流が流れますから谷電流値よりも大きく ON の状態ですが、放電が終わりにかけると  $I_E$  の値は  $V_1/R_1$  の値となり、谷電流値以下となって UJT は \_\_\_\_\_ の状態にもどってしまいます。



OFF

「放電後の電流  $\frac{V_1}{R_1}$  が  
ポイントですよ！」

50 そして、UJT が OFF の状態にもどるとコンデンサは再び充電を始め、コンデンサ両端の電圧が \_\_\_\_\_ していきます。

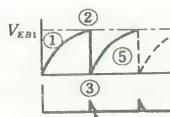
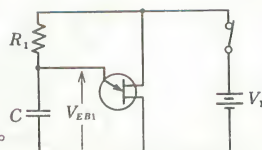


上昇  
アレ アレ  
また 充電される  
わけですね  
「そう いう こと」

51 すなわち、図の回路で  $R_1$  の値を大きくして  $V_1/R_1$  の値が谷電流値以下になるように設定しておくと、つぎのように UJT が ON, OFF を繰り返す、スイッチ S を切らないかぎり何度もトリガ・パルスが発生し続けるようになります。

これはつまり、発振現象を起こしていることになります。

- ① コンデンサが充電され  $V_{EB1}$  が上昇する。
- ②  $V_{EB1}$  が  $V_1$  の  $1/2$  の値になると、UJT が(ア) \_\_\_\_\_ になる。
- ③ コンデンサの放電電流が流れる。
- ④ 放電電流がなくなり、UJT を流れる電流が谷電流値以下となって、UJT は(イ) \_\_\_\_\_ にもどる。
- ⑤ 再びコンデンサが(ウ) \_\_\_\_\_ を始める。



(ア) ON

(イ) OFF

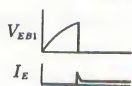
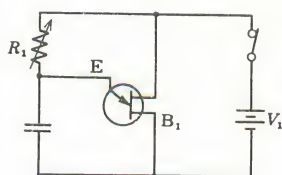
(ウ) 充電

ナールホド  
連続したトリガ・パルス  
が できるわけだ。

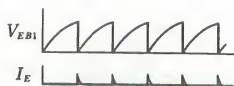
52 いままでは図 a のように、UJT が ON となってトリガ・パルスをつつ出すと、コンデンサの放電が終わったあとも ON の状態を持続するものとして取り扱ってきました。

しかし、抵抗  $R_1$  の値を大きくすると、図 b のように電圧  $V_1$  を加えているかぎりトリガ・パルスを出し続けるという動作をするようになるわけです。

UJT の場合は、一般に谷電流値が数ミリ・アンペアの値をもっていますから、 $R_1$  の値を数十キロ・オーム以上にすると、このような動作をするようになります。



(図 a)  $R_1$  が小さいとき



(図 b)  $R_1$  が大きいとき

でも  
 $R_1$  を大きくすると  
トリガ・パルスのふる  
位置が、遅くなるんじや  
なかったかなあー

「そうですよ  
でも その分だけ  
C の値を 小さくして  
おけば いいでしょ」

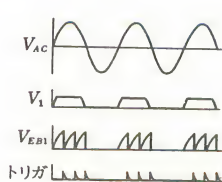
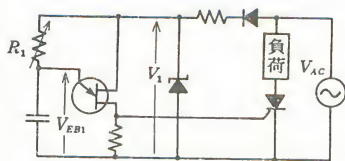
53 それでは、このような動作をさせた UJT で SCR を駆動すると、どうなるでしょうか。

UJT に電源電圧が加わっている間はトリガ・パルスを出し続けますから、UJT からのトリガ・パルスはつぎのようになります。

すると、SCR に対してトリガはどこでかかるでしょうか。

図の場合は三つのトリガ・パルスが出ていますが、この最初のトリガ・パルスで SCR は駆動されます。

つまり、トリガ・パルスは三つ出ても、最初のパルスで SCR は ON になってしまいますから、基本動作はいままでのように一つのトリガ・パルスを出していたときとまったく同じです。

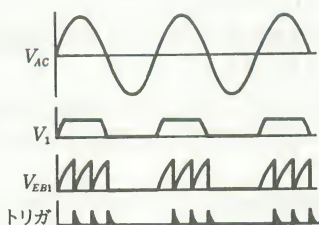


フーン  
それじゃ なぜ  
発振させるわけですか

「次のフレームへ  
どうぞ」

54 ところで、このようにすると、何かの異常現象で一つ目のトリガ・パルスで SCR が駆動されなかった場合でも、次のパルスで駆動されるようになります。

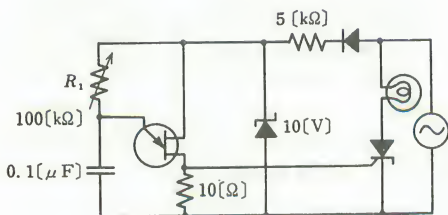
このようなことから、一般にはこのように UJT を発振させるような使い方をしています。



ナールホド  
不発のときの  
着後策 というわけか

「そう いう こと」

55 図の回路は、UJT を用いてランプの明るさを連続的にコントロールする回路です。



「どくも  
ご苦労さんでした」



# 練習問題

- 1 つぎの文章の \_\_\_\_\_ の中に適する言葉を入れ、文章を完成しなさい。
- (1) 位相制御とは、負荷に加える交流電圧の位相角を変化して、負荷に供給する電力を \_\_\_\_\_ 的に制御する方法です。
- (2) 位相制御を行うには、交流電圧の任意の位相でSCRやトライアックにトリガ入力を加える必要がありますが、そのための回路を \_\_\_\_\_ 回路といっています。
- (3) UJTは $B_1B_2$ 間に加えている電圧( $V_{B21}$ )に対して、 $EB_1$ 間電圧( $V_{EB1}$ )がある値に達すると、Eと(ア) \_\_\_\_\_ の間がON状態になりますが、このときの $V_{B21}$ と $V_{EB1}$ との比( $\frac{V_{EB1}}{V_{B21}}$ )を(イ) \_\_\_\_\_ といっています。
- (4) UJTをONにしたのち、 $I_E$ の値を減少していくと、もとのOFFの状態にもどりますが、このときの $I_E$ の値を \_\_\_\_\_ といっています。

- 2 つぎの文章は図のUJT回路についての説明です。  
それぞれの問いに答えなさい。

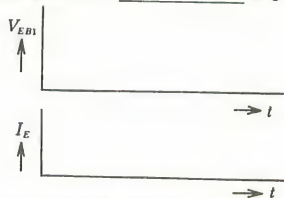
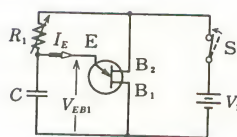
- (1) 文中の \_\_\_\_\_ に適する言葉を入れなさい。

① スイッチSを入れると $EB_1$ 間電圧 $V_{EB1}$ は上昇しますが、この速度は抵抗 $R_1$ の値が大きいほど \_\_\_\_\_ くなります。

②  $V_{EB1}$ が $V_{B21}$ のほぼ $1/2$ の値まで上昇すると(ア) \_\_\_\_\_ 間がONとなり、大きな放電電流が流れますが、この放電が終わると、電流 $I_E$ の値はおおよそ(イ) \_\_\_\_\_ となります。

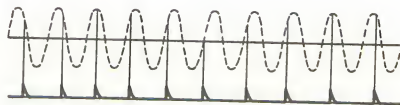
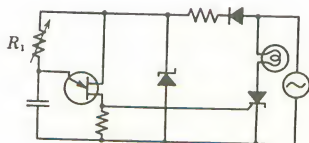
- (2) スイッチSを入れたのち、 $V_{EB1}$ および $I_E$ が時間の経過とともにどのようになるかを図示しなさい。

ただし、 $V_1/R_1$ の値はUJTの谷電流値よりかなり小さいものとします。



- 3 図はUJTを用いてゲート・トリガ回路を構成した位相制御回路です。

- (1) 電源電圧に対して図のようなトリガ・パルスが出てくる場合、ランプに加わる電圧はどうなるかを、交流電源波形上に重ねて記入しなさい。
- (2)  $R_1$ の値を大きくすると、ランプの明るさはどのようにになりますか。

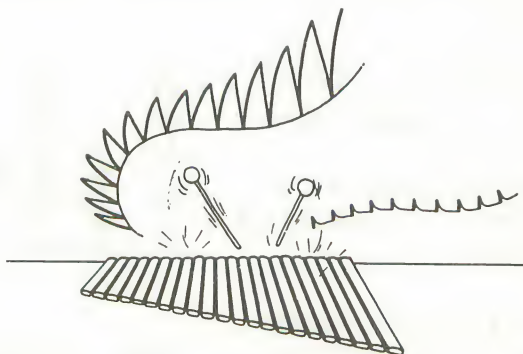




## 8. 位 相 制 御 (Ⅱ)

### 学 習 の 目 標

1. 第7章で学習した位相制御を基礎にして、PUTやダイアックを用いた位相制御について学習する。
  - (1) PUTやダイアックとは、どのような半導体素子か。
  - (2) PUTやダイアックを用いて位相制御を行うには、どのようにすればよいのか。
2. UJTやPUTを用いてトライアックを駆動する方法について学習する。
3. 検出器出力に応じて位相制御を行う方法について学習する。



## 学習の概要

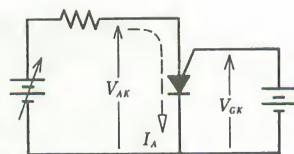
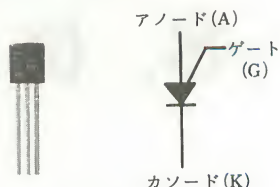
### 1. PUT (プログラマブル・ユニジャンクション・トランジスタ)

PUTとはアノード(A)、カソード(K)、ゲート(G)と呼ばれる3本の電極をもち、図のような図記号で示される半導体素子で、つぎのような動作をするものです。

- (1) 図のようにGK間に電圧 ( $V_{GK}$ ) を加えておき、AK間電圧 ( $V_{AK}$ ) を上昇していくと、 $V_{AK}$  が  $V_{GK}$  よりもおおよそ0.7[V]高くなるとときAK間がON状態になり、電流  $I_A$  が流れるようになります。

- (2) PUTを一度ONにしたのち、もとのOFF状態にもどすには、電流  $I_A$  をある値以下にする必要があります。

この電流値のことを谷電流といっています。

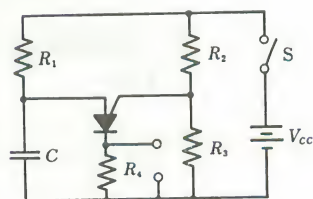


### 2. PUTによるトリガ発生回路

- (1) PUTを図のように接続し、スイッチSをONにすると、一定時間後にトリガ・パルスが発生するようになります。

- ① スイッチSをONにしたのちトリガ・パルスが出るまでの時間は、Cと $R_1$ の積によって決まります。

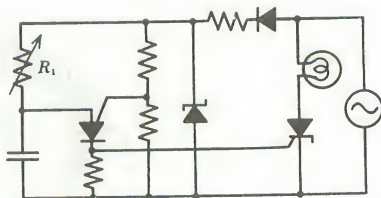
$CR_1$  が大きいほど遅く、 $CR_1$  が小さいほど早くなります。



- ②  $\frac{V_{cc}}{R_1}$  の値を小さくしておけば、

トリガ・パルスは連続して出力されるようになります。

- (2) 図の回路はPUTを用いてトリガ・パルスを生じ、ランプの明るさを制御する回路です。

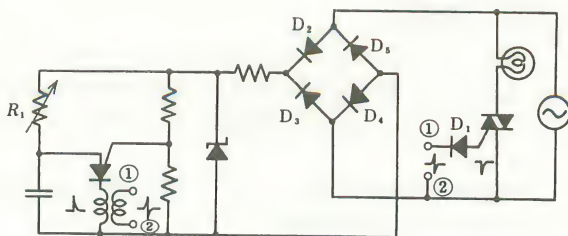


### 3. PUTによるトライアックの駆動

図の回路は、PUTを用いてトライアックを駆動し、位相制御を行う回路です。

- (1) ダイオード  $D_2 \sim D_5$  で交流電源の負の半波の期間にもPUT回路に正の電圧が加わるようにし、トリガ・パルスが発生するようにしています。

- (2) パルス・トランスを通じてPUT回路で発生したトリガ・パルスをトライアックに結合し、ダイオード $D_1$ でトライアックに負のパルスが加わるようにしています。



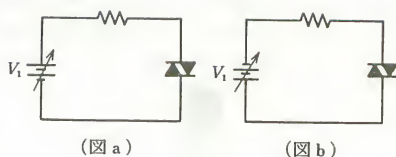
#### 4. ダイアック

- (1) ダイアックとは、二つの電極をもち、図のような図記号で示される半導体素子で、つぎのような動作をするものです。

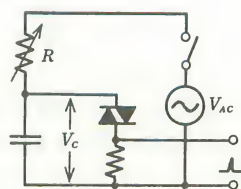
- ① 図 a や図 b のように電圧  $V_i$  を加え、ダイアックの両端の電圧を上昇していくと、ある値を越えたときに二つの端子間が ON の状態になります。

この電圧値のことをブレークオーバー電圧 ( $V_{Bo}$ ) といっています。

- ② 一度 ON になったあとは、ダイアックに流れている電流がある値以下になると、もとの OFF 状態にもどります。

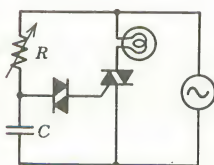


- (2) ダイアックを図のように接続し、交流電圧 ( $V_{Ac}$ ) を加えておくと、 $R$  の値によって  $V_{Ac}$  の任意の位相でトリガ・パルスを発生するようになります。

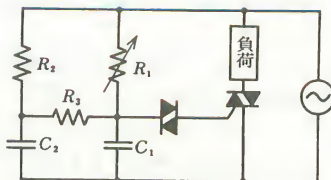


#### 5. ダイアック応用回路

- (1) 図 a のような回路を構成し、 $R$  を変化すると、ランプの明るさを制御できるようになります。



- (2) しかし、図 a の回路ではランプを明るくしていくときに急に明るさになってしまうという欠点があります。



(図 a)

(図 b)

このようなことから、一般には図 b のような回路を利用しています。

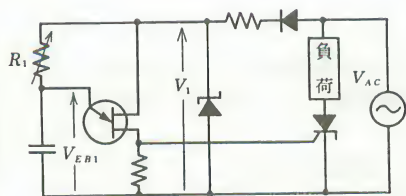


## 学習の展開

1 第7章では、位相制御とはどのようなものかということ进行学习し、UJTを用いて具体的に位相制御をかける方法について学习してきました。

図の回路は、UJTを用いてトリガ・パルスを発生し、SCRに位相制御をかけるための回路です。

可変抵抗  $R_1$  を小さくするとランプは(ア)\_\_\_\_\_  
 くなり、大きくするとランプは  
 (イ)\_\_\_\_\_  
 ります。



さあ スタートだ

「この章で 第2段階の  
 学習は 終了ですよ」

ヨーシ

ガレバるぞ!!

(ア) 明る

(イ) 暗

2 では、この章ではいままでの学習を基礎にして、PUTやダイアックといったゲート・トリガ素子を利用して位相制御をかける方法について学習していきましょう。



PUT



ダイアック

学習の進め方としては、いままで学習したUJTと非常によく似た動作をするPUTを先に取りあげ、そのあとでダイアックを用いた位相制御をみていきましょう。

まずは PUT から

Let's go!

### 3 PUTによる位相制御

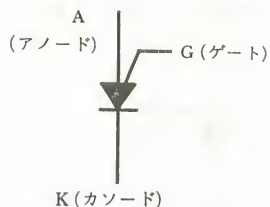
まず、PUTとはどのような素子かということから学習していきましょう。

PUTとは、プログラマブル単接合トランジスタ (Programmable Unijunction Transistor) の略で、言葉のとおりユニジャンクション・トランジスタの前にプログラマブルとついただけのもので、UJTとよく似た動作をするものです。

しかし、価格がUJTよりも安く、一般の位相制御素子としてよく用いられます。

「PUTの価格は  
 一般に 数10円です」

4 PUTは図のように、A (アノード)、K (カソード)、G (ゲート) という3本の端子をもっており、つぎのような図記号で示されるものです。

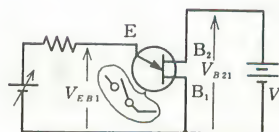


SCRとよく似た  
図記号ですね

「でも ゲートをつける  
位置が違でしょ」

5 それでは、PUTがどのような動作をするかをみていきましょう。

UJTの場合は、図のように $B_1$ 、 $B_2$ 間に電圧 $V_{B21}$ を加えておいて $V_{EB1}$ を上昇していくと、 $V_{B21}$ の約半に達したときに $EB_1$ 間が  
(ア) \_\_\_\_\_ の状態になりました。



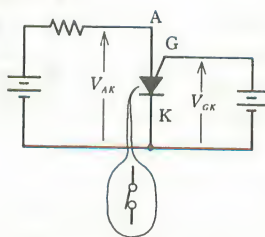
(ア) ON (イ) OFF

そして、その後 $EB_1$ 間に流れる電流を減少していくと、谷電流値以下になれば、もとの(イ) \_\_\_\_\_ の状態にもどりました。

UJTについては  
もう バッチリ

6 PUTもUJTと同じような動作をします。

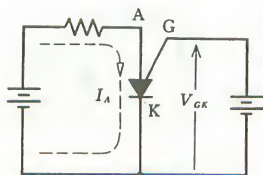
図において、GK間に加えている電圧 $V_{GK}$ よりも、AK間に加えている電圧 $V_{AK}$ のほうがおよそ0.7 [V]程度高くなると、PUTのAK間がONの状態になります。



「違いをはっきり  
して下さいヨ」

ハイ ハイ

7 そして、その後AK間に流れている電流 $I_A$ を減少していくと、谷電流値以下になると、もとのOFFの状態にもどるといふものです。

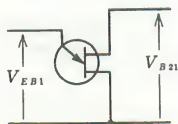


この動作は  
どれも 同じだねー

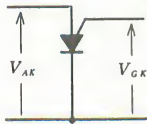
「覚えて下さいヨ」

8 すなわち、図 a の UJT では、 $V_{EB1}$  が  $V_{B21}$  の約  $\frac{1}{2}$  の値になると  $EB_1$  間が ON になりました。

しかし、図 b の PUT では、 $V_{AK}$  が  $V_{GK}$  より約 0.7 [V] 高くなると AK 間が ON になります。



(図 a) UJT の場合

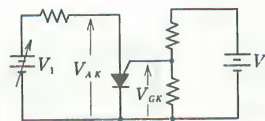


(図 b) PUT の場合

「ここが  
ホーレットですよ」

おは!

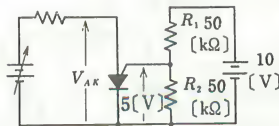
9 したがって、図のように電圧  $V_{GK}$  を加えておいて  $V_1$  を増加していくと、 $V_{AK}$  の値が  $V_{GK}$  の値よりもおよそ \_\_\_\_\_ [V] 高くなったとき AK 間が ON の状態となります。



0.7

フン フン

10 つまり、図のように  $V_{GK}$  として 5 [V] の電圧がかかっている場合には、 $V_{AK}$  が \_\_\_\_\_ [V] 以上になれば AK 間が ON になります (G 端子にはほとんど電流が流れませんから  $R_1$ ,  $R_2$  はかなり大きな値にしても問題はなく、一般には数十キロ・オーム程度の値にしています)。



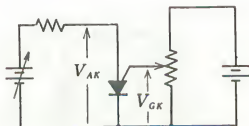
5.7

フン フン

「じゃ  $V_{GK}$  をかえると  
どうなるかな」

11 そして、 $V_{GK}$  の値を図のようにして可変抵抗で変化させると、ON にする AK 間電圧も自由に設定できるようになります。

名称にプログラマブルとについているのは、このように GK 間電圧によって PUT を ON にする AK 間電圧を自由に設定できるということからです。

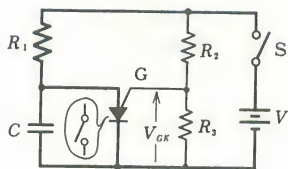


なるほど  
プログラマブルは  
 $V_{GK}$  の働きと  
いっわけか

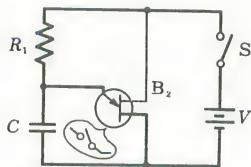
「そう いう こと」

12 このようにPUTとUJTとは、図記号や端子記号は異なりますが、ほとんど同じような動作をします。

では、PUTを図aのように接続した場合を考えてみましょう。



(図 a)



(図 b)

図bはすでに学習したUJTの回路ですが、これらの回路は太線で示したようにほとんど同じといえます。

ただ、UJTの場合は $B_2$ 端子を直接電源に接続していたのが、PUTでは抵抗 $R_2$ 、 $R_3$ を通じてG端子に接続しているという点が異なるだけです。

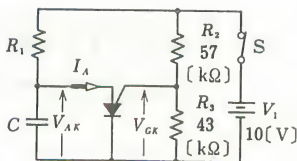
「素子の接点印はどちらでもコレクタサ端子に接続されているでしょ」

フン フン

13 PUTをこのように接続すると、いままでのUJTと同じようにトリガ・パルスが発生するようになります。

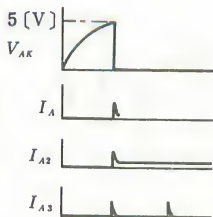
では、回路の動作を順にみていきましょう。

- ① スイッチSを入ると $V_{GK}$ の電圧は $R_2$ 、 $R_3$ に57[kΩ]、43[kΩ]を接続していますから(ア) [V]となります。  
一方、 $V_{AK}$ は $R_1$ を通じてCが充電されるため、徐々に(イ) していきます。



(ア) 4.3

- ②  $V_{AK}$ が5[V]に達すると、PUTは(ウ) となり、急激な放電電流( $I_A$ )がAK間を流れます。



(イ) 上昇

(ウ) ON

- ③ そして放電終了後にPUTを流れる電流( $I_A$ )が谷電流値以上のときはONを持続し、 $I_{A2}$ のようなAK間電流が流れます。

また、谷電流値以下の場合はOFFとなり、再度充電され、 $I_{A3}$ のように連続したパルス電流が流れます。

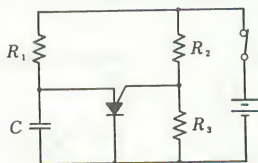
ナルホド  
UJTと(ほとんど)  
同じ 動きたなあ

「……でしょ」



14 UJTに対して、PUTの場合は一般に谷電流値が非常に小さいため、 $R_1$ の値をかなり大きくしなければ連続的なトリガ・パルスを取り出すことはできません。

一般にPUTの谷電流値は、数10～100 [ $\mu$ A]程度で非常に小さく、発振させて利用しようという場合は、 $R_1$ の値として100 [ $k\Omega$ ]程度以上のものを用いる必要があります。

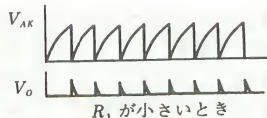
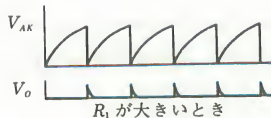
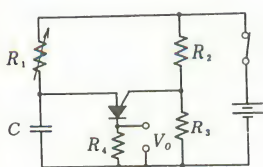


「一般には 前章で  
学習したように  
発振するように  
しています」

ナルホド

15 そして、図のようにカソードに抵抗 $R_4$ を入れて、その両端から出力を取り出すようにしておき、 $R_1$ を変化させると、トリガ・パルスが出る位置を図のように変化させることができますようになります。

すなわち、UJTの場合と同じような動作をさせることができるわけです。



UJTとよく  
似てるんだア...

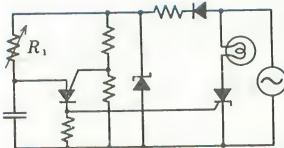
「しかし 違いは よく  
覚えて おいて下さいヨ」

ハイ ハイ

「プログラマブルレ  
イクことではヨ」

16 図の回路は、PUTを用いてSCRに位相制御をかけ、ランプの明るさを変化させる回路です。

$R_1$ の値を小さくすればランプは(ア) くなり、大きくすればランプは(イ) になります。



(ア) 明る

(イ) 暗

17 以上でPUTとはどのようなものか理解できたと思います。

ところで、いままではUJTやPUTを用いて、SCRを駆動することを中心に学習してきました。

しかし、SCRでは交流の半波しか位相制御をかけることができません。

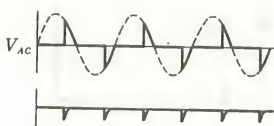
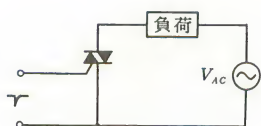
ウーレ

全波の位相制御も  
ほしいアア



18 そこで次に、トライアックを利用して交流の正の半波に対して負の半波に対しても位相制御がかけられるようにするにはどうすればよいのかを学習していきましょう。

このようにするためには、正の半波でも負の半波でもトリガ・パルスが発生させる必要がありますし、また、そのトリガ・パルスの極性は図のように負でなければなりません。



なぜ「負でない」と  
「正でない」かな？

「覚えてないかな」  
トライアックに「負」の電圧  
を加えるときは、感度  
に不安定さがあったでしょ」



19 では、負の半波でもトリガ・パルスが発生し、またトライアックに負のトリガ・パルスが加わるようにするには、どうすればよいでしょうか。

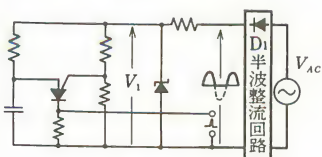
まず、負の半波の期間でもトリガ・パルスが発生させる方法から考えてみましょう。

いままでは、ダイオード  $D_1$  を用いて交流電源の正の半波だけを、PUT回路に加えていました。

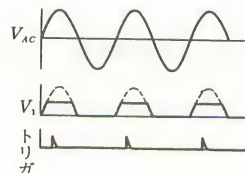
ですから、電圧  $V_1$  も図のようになり、負の半波の期間にはトリガ・パルスが発生しなかったのです。

ところで、図 c のように交流電源の負の半波も正方向の電圧になるような回路をつけて、この出力を PUT に加えるとどうでしょう。

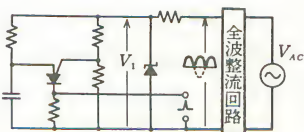
このような回路にすると、PUT の回路に加わる電圧  $V_1$  は図 d のようになり、交流電源 ( $V_{AC}$ ) が負になっている期間にもトリガ・パルスが出るようになります。



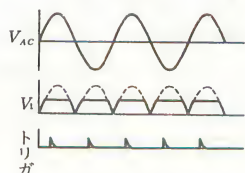
(図 a)



(図 b)



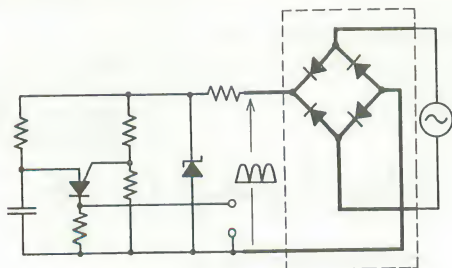
(図 c)



(図 d)

「図 a のように、  
交流電圧から、正の半波  
だけを取り出す回路を、  
半波整流回路といい、  
図 b のように、正、負  
ともに、出力には 正の  
電圧を取り出すような回  
路のことを、全波整流回  
路といいます」

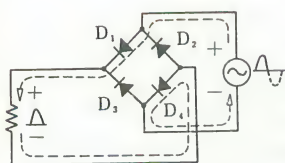
20 このような動作をする回路は、四つのダイオードを用いて図のように構成すると得られます。



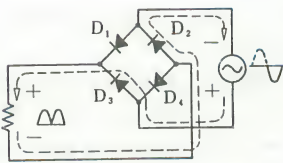
「一般に  
ダイオードブリッジと  
呼んでるんだよ」

21 ダイオードを図のように接続しておくと、交流電源の正負いずれの半波のときにもつぎのような動作をして、常に正の電圧が得られます。

- (1) 交流電源が正の期間には、図 a のように  $D_1$ 、(ア) \_\_\_\_\_ を通じて正の電圧を出します。
- (2) 交流電源が負の期間には、図 b のように  $D_3$ 、(イ) \_\_\_\_\_ を通じて正の電圧を出します。



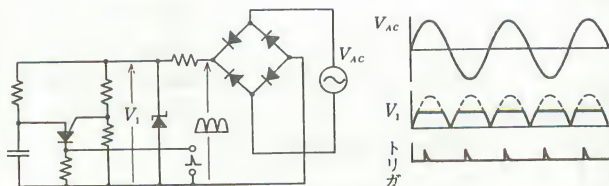
(図 a) 正の半波のとき



(図 b) 負の半波のとき

「抵抗に  
流れる電流の方向は  
同じにならねえよ」

22 すなわち、交流電源を図のような回路を通して加えると、交流電源の負の半波の期間でもトリガ・パルスが出力されるようになります。



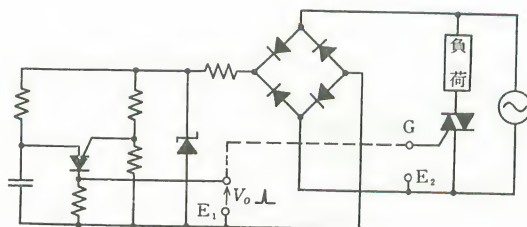
そこで このPUTの出力を  
トライアックに  
加えれば、いいわけだ

「次のフレームへ  
どうぞ」

23 とところで、このようにして交流電源の正の半波でも負の半波でもトリガ・パルスを取り出せても、このトリガ・パルスを図のように直接トライアックに加えることはできません。

それは、つぎの二つの理由によります。

- (1) トリガ出力端子の接地側  $E_1$  と、トライアックのトリガ・パルスを加える端子の接地側  $E_2$  が共通でないため、単に破線のように接続しても、PUT の出力電圧 ( $V_o$ ) がトライアックの  $G$   $E_2$  間に加わらない。
- (2) トリガ・パルスの極性が正になっているため、破線のように接続するとトライアックの動作が不安定になる。



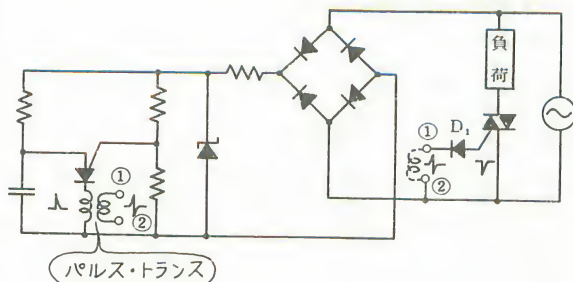
じゃ  
どくすれば  
いいかな

「次のフレームへ  
どうぞ」

24 そのため、一般にこのような場合は、図のようにPUTのトリガ・パルス出力を変圧器を用いてトライアックのGT<sub>1</sub>間に結合し、さらに図のようにダイオード ( $D_1$ ) を接続して負のパルスが加わるようにしています。

このようなところで使う変圧器は、パルス信号に対してよい特性をもつパルス・トランスと呼ばれているものが使われます。

PUTの出力をこのようにパルス・トランスを用いて結合する方法はよく用いられますから覚えておいてください。



この場合の変圧器は  
電圧の大きさをかえるのが  
目的じゃない  
わけですね

「そう、いふこと」  
「トリガ・パルスを  
結合するためものです」



29 いままでは  $R_1$  を通じてコンデンサを充電していましたが、このようにトランジスタを通じてコンデンサの充電電流を流すようにすれば、つぎのような動作をするようになります。

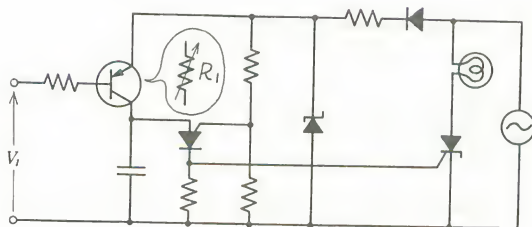
$V_i$  が大きいときは  $I_B$  がほとんど流れず、トランジスタのコレクタ電流（コンデンサへの充電電流）もほとんど流れません。

したがって、トリガ・パルスが出る位置は遅くなり、ランプはほとんど点灯しません。

ところが、 $V_i$  が小さくなると、トランジスタのコレクタ電流（コンデンサへの充電電流）が大きくなり、トリガ・パルスも(ア)く出て、ランプは(イ) くなります。

(ア) 早

(イ) 明る

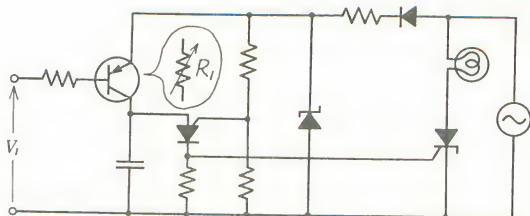


ナルホド  
コレクタへの  
充電電流を  $V_i$  で  
コントロールするわけだ

「そう いわ こと」

30 いままでは、可変抵抗を用いてランプの明るさを連続的に変化させていましたが、このようにトランジスタを用いてコンデンサの充電電流を変化させるようにすれば、電圧 ( $V_i$ ) で負荷を制御できます。

すなわち、 $V_i$  のところに検出器からの出力を加えると、自動的に負荷を制御することができるようになるわけです。

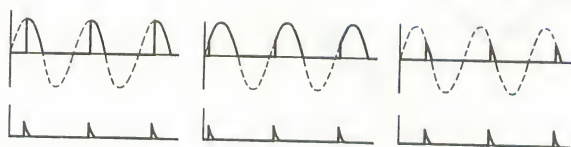


ナルホド  
ナルホド





33 これに対して、連続的に負荷を制御できる位相制御を用いた温度制御回路の場合は、図 a のように常に平均的にヒータが駆動されており、すこしでも温度が上昇したり下降したりすると、図 b、図 c のようにすぐにトリガ・パルスの位置が変化して、その修正動作をするようになります。



(図 a) 通常

(図 b) 温度が低下  
したとき(図 c) 温度が上昇  
したとき

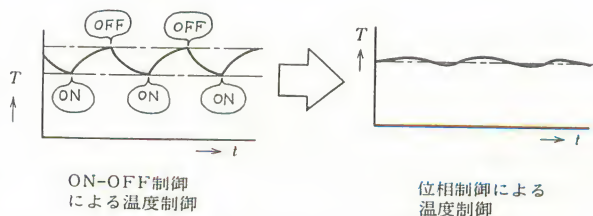
なるほど—

連続的に負荷を  
制御できるんだからなあ

34 ですから、このような位相制御を応用した連続的な制御法では、温度をある値に設定した場合、図のように非常に精度のよい温度特性が得られます。

温度変化の少ない  
なめらかな制御か  
できるわけか

35 位相制御の最大の利点は、大電力負荷を連続的に制御できるということで、これを応用すると、このように温度制御を行う場合などでも非常に高度な制御が可能になります。

ON-OFF制御  
による温度制御位相制御による  
温度制御「位相制御を勉強してきた  
かいが あったかな」

バッチリ

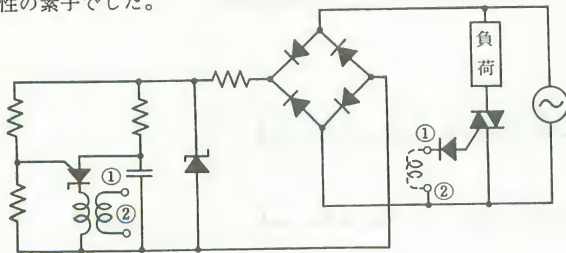
36 これまでの学習でPUTとはどのようなものか、さらにPUTを用いてSCRやトライアックを駆動し、位相制御をかけるにはどのようにすればよいのかということについて学習してきました。

では次に、ダイアックについて学習しましょう。

「いよいよ 最後の  
ゲートトリガ系  
ですよ」

## 37 ダイアック

いままで用いてきた UJT や PUT は、SCR と同じように一方性の素子でした。



そのため、PUT でトライアックを駆動する場合には、図のように全波整流回路やパルス・トランスを用いて交流電源の負の半波でも駆動できるようにくふうしました。

「回路の動作はもう OK ですネ」  
バッチリです

38 その点、これから学習するダイアックは、トライアックの駆動用として開発されたトリガ素子で、これを用いると簡単に交流電源の正の半波の期間にも負の半波の期間にも、トリガ・パルスが出せるようになります（ただし、あとで学習しますが、高精度の位相制御には不向きな面があります）。

トライアック駆動用として便利につくられているわけだ

39 ダイアックとは、二つの電極をもった図 a のような半導体素子で、図 b のような図記号で示されるものです。

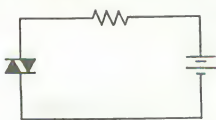


(図 a) ダイアックの外観 (図 b) ダイアックの図記号

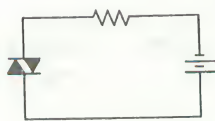
「図記号もトライアックに似てるでせよ」

40 そして、その動作は、図 a や図 b のようにどちらの方向に電圧を加えても、ある値まではほとんど電流を流さず、ある電圧値を超えると ON になり、急激に電流が流れるという素子です。

そして、電流を減少していつて、ある電流値以下になれば、もとの OFF 状態にもどります。



(図 a)

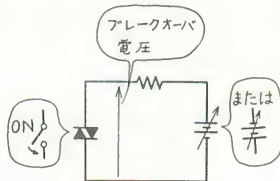


(図 b)

フーン どちらの方向にも電流を流すことができるのか

「そりゃー こと」

41 ここで図のようにダイアックの2端子間の電圧を上昇していき、ONになるときの電圧のことを、電流が流れるのを阻止していた状態がこわされるという意味から、ブレークオーバー電圧 ( $V_{BO}$ ) といっています。



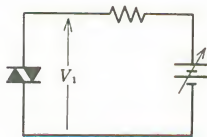
「素子は こわれませんから  
ご安心 下さい」

42 一般のダイアックの場合は、この値が30~40[V]程度です。

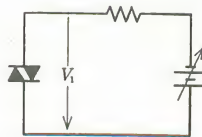
つぎの表は MA 62 というダイアックのブレークオーバー電圧を示しています。

ブレークオーバー電圧	30 [V]
------------	--------

したがって、つぎの図 a, 図 b の回路は、ともに  $V_1$  が \_\_\_\_\_  
[V] になるとダイアックが ON になって、回路に電流が流れます。



(図 a)



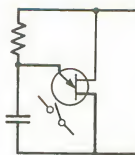
(図 b)

そして、いままでのサイリスタと同じように、一度 ON になったのちは、ダイアックを流れる電流がある電流値以下になると、もとの OFF 状態にもどります。

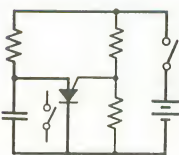
ナルホド  
OFF に戻す過程は  
どれも同じといわける

43 では、このダイアックを用いて、どのようにしてトリガ・パルスが発生させるかということですが、基本的にはすでに学習した UJT や PUT の場合と同じことです。

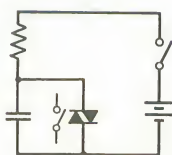
すなわち、図 c のように抵抗とコンデンサを接続し、コンデンサの両端に素子の接点部を接続すればよいのです。



(図 a) UJT



(図 b) PUT



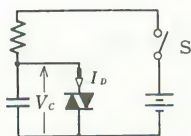
(図 c) ダイアック

基本的には  
コレクタの充電を  
利用しているわけですね

「そういふこと」



44 図 a の回路で、スイッチ S を ON にするとコンデンサの電圧が徐々に上昇していき、その値がブレイクオーバー電圧  $V_{Bo}$  に達するとダイアックは\_\_\_\_\_となって、コンデンサに蓄えられていた電荷が急激に放電され、電流  $I_D$  が流れます。



(図 a)



(図 b)

そして、コンデンサからの放電電流がなくなると、ダイアックを流れる電流は電源からの電流だけになります。

この値が谷電流値以下であれば、UJT や PUT の場合と同様にトリガ・パルスを連続して出すようになります。

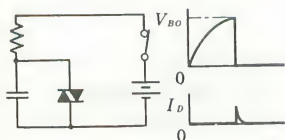
ダイアックの谷電流値は非常に大きいので、通常は抵抗の値をかなり小さくしても連続したトリガ・パルスが得られます。

ON

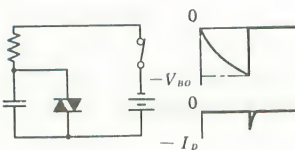
「ダイアックの谷電流値は非常に大きいので、実際には ON 状態を保持するような電流を流すと、破損してしまいます」

フーン

45 このダイアックは双方向性の素子ですから、図 a のように電圧を加えても、図 b のように電圧を加えても、同じように動作します。ただし、図 b のように負の電圧がかかれば、ダイアックを流れる電流も逆方向の電流になります。



(図 a)



(図 b)

正、負両方向のトリガ・パルスが得られるんだ

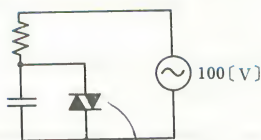
「これがダイアックの特徴なんです」

46 では、この回路に図のように 100 [V] の交流電圧を加えるとどうでしょう。

UJT や PUT の場合は耐電圧が低く、しかも一方向性ですから、100 [V] の交流電圧を直接加えることはできませんでした。

しかしダイアックの場合はブレイクオーバー電圧を越えると自動的

に ON になってそれ以上の電圧がかかることはなく、しかも双方向性の素子ですから、100 [V] の交流電圧を直接加えることができます。



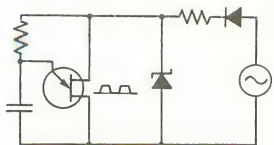
ブレイクオーバー電圧以上は加わらない

フーン

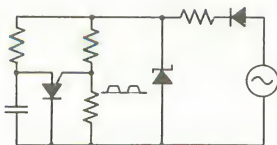
じゃ整流用のダイオードなどないといけないわけだ



47 これまで学んできた図 a, 図 b のような UJT や PUT の場合は, 電源は交流ですが, 素子は正だけの電圧で駆動していました。



(図 a) UJT の場合

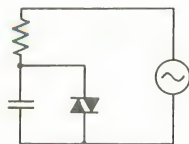


(図 b) PUT の場合

フン フン

48 ところが, いまの場合は図のようにダイアックに交流の正弦波を直接加えるわけです。

したがって, その回路動作はいままでとはすこし異なってきます。



フーレ

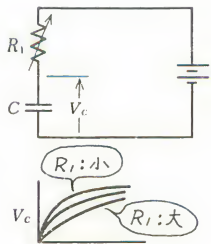
「次のフレームへ  
どうぞ」

49 では, 実際にどのような違いがあるのかをみていきましょう。

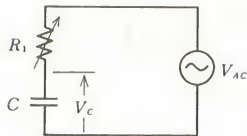
抵抗  $R_1$  の値を変化させたときのコンデンサ両端の電圧に着目してください。

いままでの回路のように直流電圧が加わった場合には, 図 a のようにコンデンサの両端の電圧  $V_c$  は,  $R_1$  が大きければ遅く, 小さければ \_\_\_\_\_ く上昇してきました。

それでは, 図 b のように交流電圧  $V_{ac}$  が加わった回路で  $R_1$  の値を変化させると, コンデンサ両端の電圧  $V_c$  はどうなるでしょうか。



(図 a)



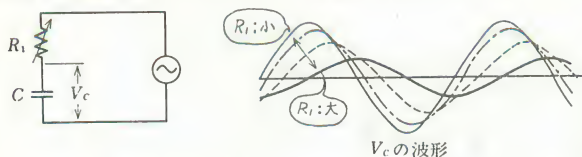
(図 b)

早

同じように 考えちゃ  
いけないかな

「次のフレームへ  
どうぞ」

50 図の回路で抵抗  $R_1$  を変化させると、コンデンサの両端の電圧  $V_c$  は  $R_1$  の値に応じてつぎのように変化します。



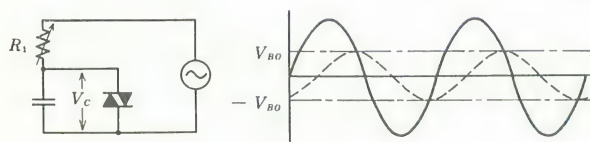
すなわち、抵抗  $R_1$  が小さければ小さいほど、コンデンサの両端の電圧  $V_c$  は電源電圧の波形に近くなりますし、逆に  $R_1$  が大きくなればなるほど、振幅は小さくなり、位相も  $90^\circ$  ずれてきます。

フーン  
こんなになるのか

「よりくわしく知りたい人は、『交流回路論』を参照して下さい。」

51 それでは、ダイアックにこの電圧  $V_c$  を加えるとどのようなのでしょうか。

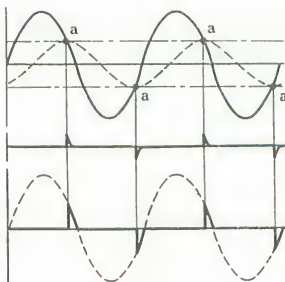
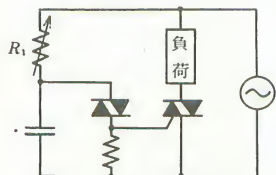
まず、抵抗  $R_1$  の値を非常に大きい状態から徐々に減少していき、 $V_c$  の値が図の破線のようにダイアックのブレイクオーバ電圧に達した状態を考えてみましょう。



ダイアックが  
ON になるわけだよ

52 この場合は、各波形の点 a のところでダイアックが \_\_\_\_\_ となり、トリガ・パルスを出します。

ですから、この出力を図のようにトライアックに接続しておくと、図のような電圧が負荷にかかるようになります (この場合のトリガ・パルスの極性は、交流電源の正のときは正、負のときは負となりますから、トライアックに直接加えても問題ありません)。



ON

なるほど

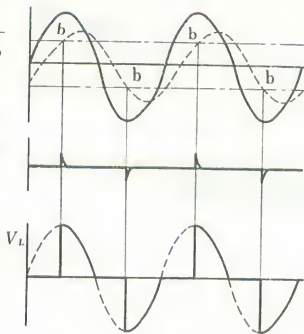
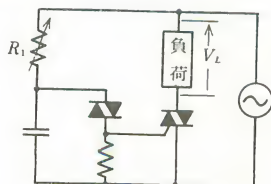
「トライアックの感度の不安定な状態は、使用しないわけですよ」

フーン フーン

53 では、 $R_1$  の値をさらに小さくして、コンデンサ両端の電圧  $V_c$  を図のようにするとどうでしょう。

この場合には、各波形の点  $b$  のところでダイアックが \_\_\_\_\_ となって、トリガ・パルスは図の位置で発生します。

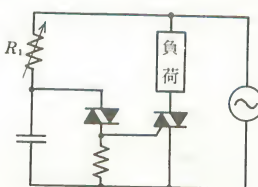
この出力をトライアックに加えておくと、図のような電圧  $V_L$  が負荷にかかります。



ON

ナルホド  
そのフレームのところが  
ポイントだね  
「そう バウ こと」

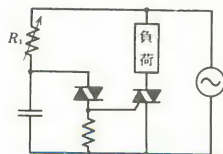
54 すなわち、図のように接続して抵抗  $R_1$  を変化させると、うまく位相制御がかけられるようになります。



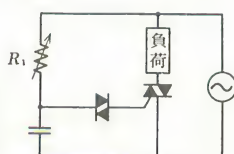
$R_1$  によって  
自由に制御できる  
わけか

55 ところで図 a ではダイアック出力を抵抗で取り出していますが、トライアックの GT<sub>1</sub> 間には抵抗が内蔵されたものもあります。

したがって、この抵抗を省略し、図 b のようにダイアック出力で直接トライアックを駆動する場合もあります。



(図 a)



(図 b)

「回路も  
ちょっと 簡単に  
なりますよ」

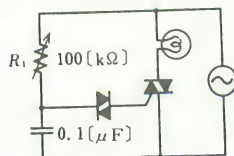
56 いままでのように UJT や PUT を用いた場合は、トライアックを駆動するときはかなりめんどろな回路になりました。

ところが、ダイアックを用いると、このように簡単にトライアックに位相制御動作をさせることができるため、ダイアックはトライアックの位相制御素子として非常によく利用されています。

なほほど  
トライアックも駆動用として  
開発されたものだから  
なあー

57 図の回路は、ダイアックを用いてトライアックを駆動し、ランプの明るさをコントロールしようとする回路です。

抵抗  $R_1$  を小さくするとランプは(ア) \_\_\_\_\_ くなり、 $R_1$  を大きくするとランプは(イ) \_\_\_\_\_ になります。

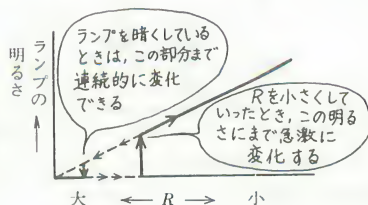
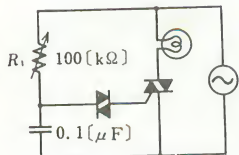


- (ア) 明る  
(イ) 暗

### 58 ダイアックによる位相制御の問題点

ところで、この非常にべんりなダイアックを用いた位相制御にもすこし問題があります。

それは、図の回路で抵抗  $R_1$  を非常に大きくしておいて、そこから徐々に小さくしていくと、ランプは徐々に明るくなるのではなく、急激にある程度の明るさになってしまうという現象です (逆に、抵抗  $R_1$  を小さくし、ランプを明るくしておいて、そこから  $R_1$  を徐々に大きくしてランプを暗くしていくときには、かなり暗いところまで連続的に変化させることができます)。

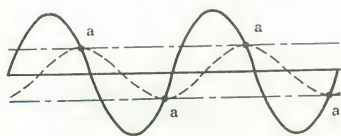
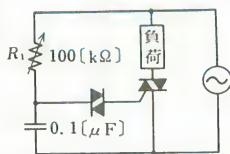


「このような現象をヒステリシス現象といっています」

「行きと 帰りかちがってくまんですよ」

59 それでは、なぜこのような現象を生じるのか、また、どのように改善しているのかということについて最後に学習しておきましょう。

いままでの学習では、抵抗値を小さくしていったコンデンサ両端の電圧が図の破線のようになったとき、常に点 a のところでトリガパルスが出ると考えていました。



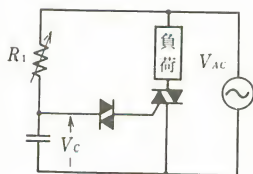
「ヒステリシスを改善しなくては、よい制御はできませんよ」

OK!

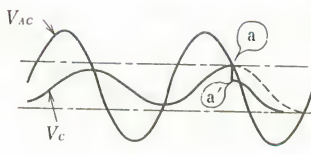
60 しかし、実際にはこのようになりません。

抵抗値を小さくしていき、図bの点aでダイアックがONになると、コンデンサは放電し、コンデンサ両端の電圧  $V_c$  がa'のように低下してしまうのです。

つまり、コンデンサ両端の電圧  $V_c$  は波線のようにはならず、実線のようになるわけです。



(図a)



(図b)

ウーレ

この波の变化が  
問題となるわけだ

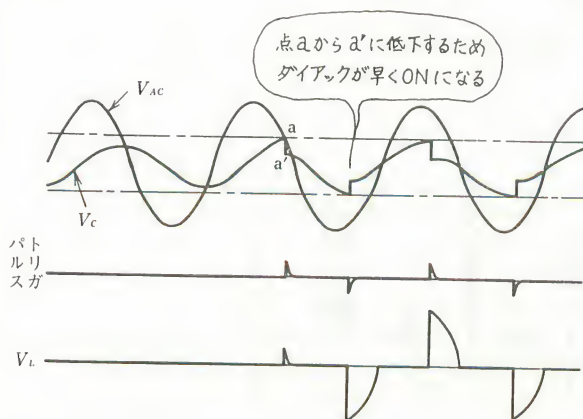
「そう いう ことだす」

61 すると、次にダイアックがONになるのは、どこになるでしょうか。

図のように、次の波形からはかなり早い時点でダイアックがONになってしまいます。

そして、トリガ・パルスも図のようになって、負荷に加わる電圧  $V_L$  は急激に大きくなってしまいます。

つまり、抵抗値を大きな値から徐々に小さくしていくと、いくらゆっくり変化させても、ランプは急に明るい状態になってしまうわけです。

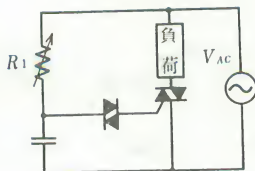


なーまほと

こいぬ 原因で  
ヒステリシスか  
起きるわけだ

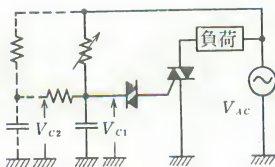


62 ダイアックは、トライアックを非常に簡単に駆動できるという利点はありますが、図のような回路では、抵抗値を小さくしていったとき、急に大きな電圧が負荷にかかるという欠点があるわけです。



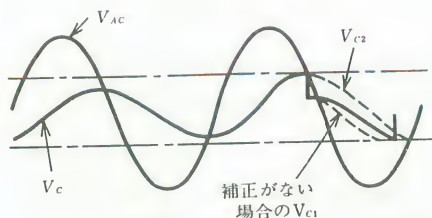
「欠点、は すぐ改善しなくては いけませんヨ」

63 そこで、この対策として、一般には図 a のように破線の回路をつけ加えて電圧  $V_{C2}$  をつくり、ダイアックが ON になって電圧  $V_{C1}$  が低下したのを補正するようにしています。



(図 a)

このようにすると、図 b のように、電圧  $V_{C1}$  は電圧  $V_{C2}$  によって図中の実線のようにすこし補正されるようになります。



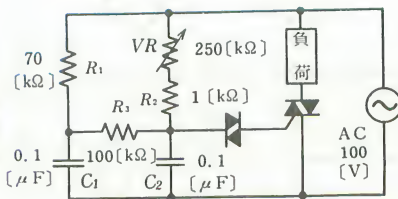
(図 b)

なるほど  
うまく 考えてるなあ

「このような回路をヒステリシスフリー回路といいますヨ」

64 図は、このような回路を応用したランプの調光装置です。

抵抗  $R_2$  は、たとえ  $V_R$  を 0  $[\Omega]$  にしてもダイアックに過大な電流が流れるのを防止するためのものです。

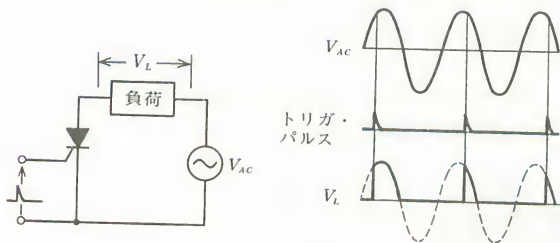


「第二段階の学習はこれで終了です。

ご苦労さんでした。」

# 進んだ学習：ゼロボルト・スイッチ

1 いままでの学習では、図のようにSCRやトライアックにトリガ・パルスを加えるタイミングをうまく制御して、負荷への電力を連続的に制御するという位相制御について学習してきました。



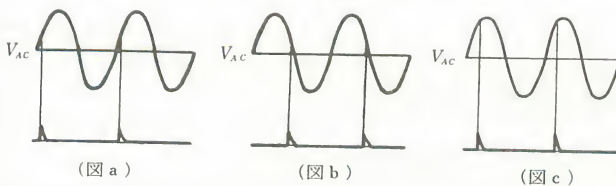
フーン フン

こは もろバッテリー

2 ところで、このような位相制御にはすこし問題があります。

図aや図bのタイミングでトリガ・パルスが加わっている場合には問題ないのですが、図cのように交流電圧がかなり大きくなった時点でトリガ・パルスが加わるような場合には問題があるのです。

(わかりやすくするために、図はSCRの場合を例に取り扱っています。考え方はトライアックの場合も同じことです)

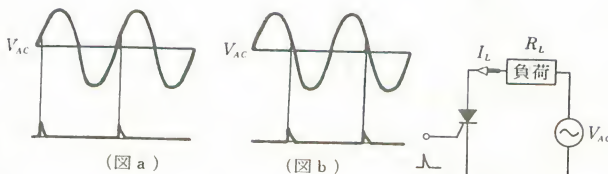


フーン

どこが 問題なのかなあ

「あとで 学習しますが、  
実は 妨害雑音を  
発生するのです」

3 図aや図bの場合では、交流電圧  $V_{AC}$  の値がまだ小さいため、SCRがONになっても大きな電流が急激に流れ始めるということはありません。



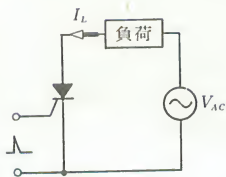
フーン フン

SCRが ONになった  
瞬間の電流  $i_L$  は

$$i_L = \frac{V_{AC}}{R_L}$$

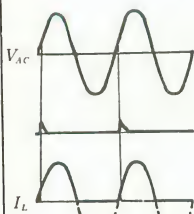
だからなあ

4 それに対して、図 c の場合には交流電圧  $V_{AC}$  がかなり大きな値になっているため、トリガ・パルスが加わって SCR が ON になると、 $I_L$  はある値まで急激に増加するわけです。

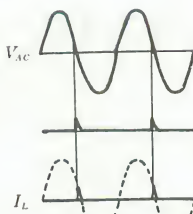


つまり、図 c の場合には  $I_L$  の値に急激な変化が生じるわけです。

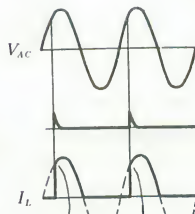
そして、負荷の定格電力が大きくなればなるほど、負荷電流の値が大きくなるため、電流の変化もさらに大きくなります。



(図 a)



(図 b)



負荷電流  $I_L$  が急激に増加する

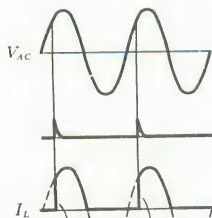
(図 c)

「この電流変化が、この学習の焦点なんですよ」

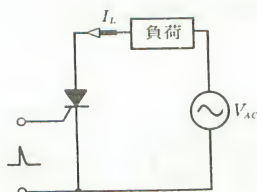
ハハーン 雑音発生の原因とわかるわけだ

5 このような急激な回路電流の変化は、雑音発生の大きな原因となります。

つまり、SCR が ON になるときに大きな雑音を発生し、周辺の電気機器に妨害を与えるようになるわけです。



この電流変化が雑音発生の原因となる

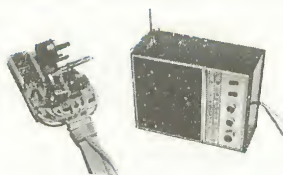


フーン さうと 位相制御装置は雑音発生源とわかるわけだ。

「さーすか」

6 たとえば、位相制御を利用した回路のそばにラジオを近づけてみてください。

ラジオにはザーツという雑音はいるようになりました。

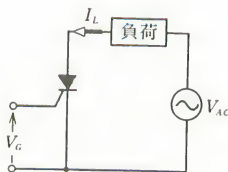
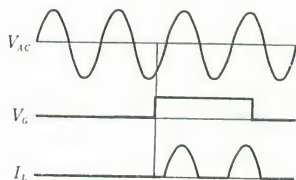


「位相制御回路を  
つくったときは、  
一度 実験して  
みて下さい。」

7 すなわち、位相制御は負荷を連続的に制御するという意味では非常によい方法なのですが、大きな電流変化を生じるということから、\_\_\_\_\_の発生源となることをじゅうぶん注意する必要があります。

雑音

8 そのため、このような雑音の発生が問題になる場合には、機能上、許される範囲で、第6章で学習したようなON-OFF制御を利用しています。



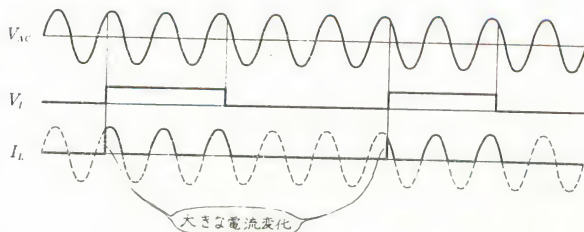
なるほど  
ON, OFF制御が  
急激な電流変化が  
起こらないわけだ。

「次のフレーム、  
じくじく」

9 しかし、ON-OFF制御の場合も、図のように入力電圧  $V_i$  を加えた最初の時点では大きな電流変化を生じる場合があります。

したがって、図のようにON, OFFをひんばんに繰り返すようになれば、やはり問題があるわけです。

そこで、ON-OFF制御とはいっても、入力電圧  $V_i$  を加え始めた最初の時点でも、このような急激な電流変化を生じないように工夫をしています。



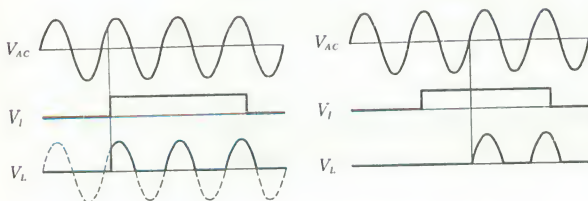
フン フン  
最初の一歩だけは  
問題があるなあ。

でも  
じょうやうな工夫を  
しているのから

10 つまり、図 a のように  $V_i$  を加えてすぐに SCR やトライアックを動作させるのではなく、図 b のように  $V_i$  が加わってから次の正弦波がくるのを待って、その波形の 0 [V] 付近から SCR を ON にするわけです。

このようにすれば負荷電流が急激に変化することはありません。

このような動作をする回路をゼロボルト・スイッチ回路とか、ゼロクロス・スイッチ回路といっています。



(図 a)

(図 b)

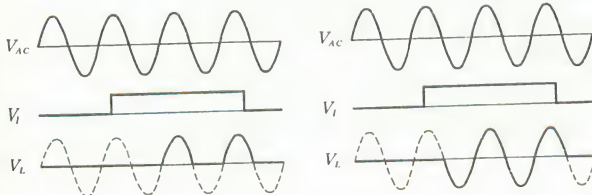
ゼロボルトのところで、  
SCR を ON にしたり、  
OFF にしたりするから、  
ゼロボルトスイッチだ。

「そうなんです、  
雑言のせいで  
転落するためにネ」

11 つまり、第 6 章で学習したように、入力電圧 ( $V_i$ ) が加わるとすぐに SCR やトライアックが ON になるというのではなく、急激な電流変化を避けるために、図のように入力電圧 ( $V_i$ ) が加わってから次の正弦波の \_\_\_\_\_ [V] 付近で SCR やトライアックが ON になるように細工をするわけです。

(1) SCR の場合

(2) トライアックの場合



なるほど  
でも どうすれば  
いいのかな?

「次のフレームへ  
どうぞ」

12 それでは、このようなゼロボルト・スイッチ回路を構成するにはどのようにすればよいかを学習していきましょう。

ゼロボルト・スイッチ回路を構成するにはいろいろな方法があり、また、このための集積回路も市販されていますが、ここでは基本構成とその事例について学習しておきましょう。

「ゼロボルトスイッチ回路  
は、よく使われますか  
う、基本をしっかり  
把握して下さいヨ」

ハニー



13 さて、このようなゼロ

ボルト・スイッチ回路を得

る方法ですが、基本的には、

さきほど学習したように入

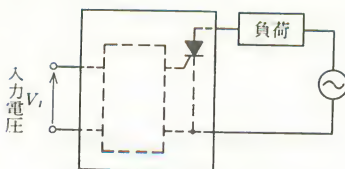
力電圧  $V_i$  が加わってもそれ

を直接SCRやトライアッ

クに加えるのではなく、次の

\_\_\_\_\_ [V] 付近でSCRやトラ

イアックを駆動するわけです。



「ここは  
もう大丈夫ですね」

OK, OK

0

14 ゼロボルト・スイッチ

動作は、一般には図のよう

に交流電源の0 [V] 付近で

だけ電圧が出るようなゼロ

ボルト信号をつくり、さら

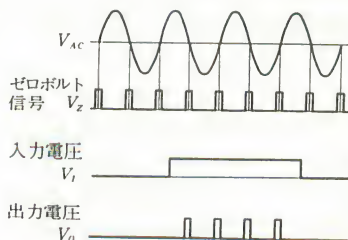
にこのゼロボルト信号と入

力電圧  $V_i$  とが同時に加わ

ったときにだけ出力電圧  $V_o$

が出るような回路を構成し、この出力電圧  $V_o$  をSCRに加えるよう

にして得ています。



「 $V_o$  をSCRに加えると、  
本当に、ゼロボルト動作  
をするかな」

「聞くだけでなく、  
確認して進んで下さい」

15 このようにするとSCR

をONにするための入力電圧

$V_i$  が加わっても、SCRはす

ぐにはONにならず、次のゼ

ロボルト信号  $V_z$  が加わると

ONになります。

したがって急激な電流変化

を生じることはなくなります。

つまり、ゼロボルト・スイ

ッチ回路は、交流電源の0[V]

を検出するゼロボ

ルト検出回路と、

このゼロボルト信

号  $V_z$  と入力電圧

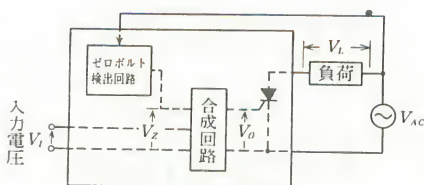
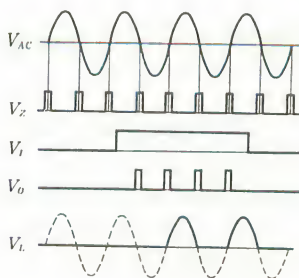
$V_i$  とがともに加わ

ったときにだけ出

出力電圧  $V_o$  が出る

合成回路で構成さ

れているのです。



「ここが、この学習の  
ポイントです」

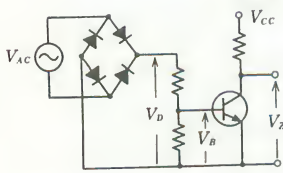
フン フレ

ゼロボルトスイッチの  
原理と、基本構成だね。

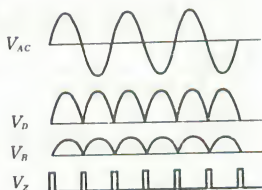
16 それでは、どのようにすればこのような 0 [V] を検出する動作や合成動作を得ることができるのかということについて、すこしまておきましょう。

17 0 [V] の検出は、図 a のように交流電圧  $V_{AC}$  を全波整流し、その出力  $V_D$  を分圧してトランジスタに加えることによって得ることができます。

すなわち、このようにしておくと、交流電圧  $V_{AC}$  が 0 [V] 付近のときには  $V_B$  が 0.7 [V] 以下となり、トランジスタが \_\_\_\_\_ となりますから、コレクタ電流が流れず、図のような出力電圧  $V_Z$  が出るようになります。



(図 a)



(図 b)

OFF

なるほど  
うまく考えているなあ

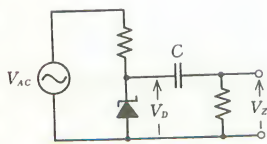
「基本は  
トランジスタの  
スイッチ動作です」

18 また、図 a のように交流電圧をツェナ・ダイオードに加え、その出力を C と R の微分回路に加えても、図 b のように 0 [V] の検出ができます。

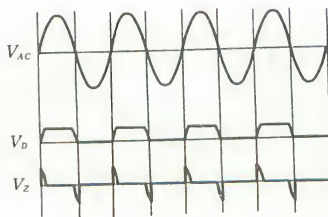
図 a のようにツェナ・ダイオードに交流電圧  $V_{AC}$  を加えると、ツェナ・ダイオード両端の電圧  $V_D$  は図のようになります。

そして、この電圧が C, R の微分回路に加わると、 $V_D$  が変化するときだけに充放電が行われ、図のような出力電圧  $V_Z$  が得られます。

しかし、この回路では負の半波の期間にはトリガ・パルスが出ていませんから、トライアックの駆動には使用できません。



(図 a)



(図 b)

$V_Z$  には 正負のトリガ  
パルスが出てきけるなあ

「でも じつは  
 $V_{AC}$  の正の期間にだけなあ」

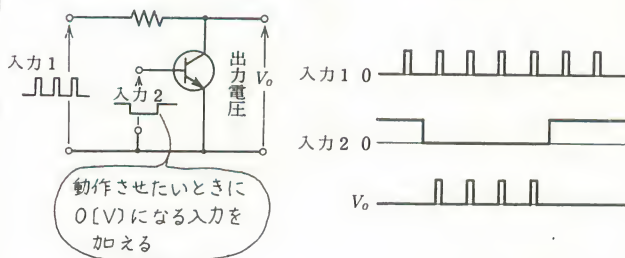
アールネド

19 そして、0[V]の検出電圧と入力電圧とが同時に加わったときにだけ出力を出すような合成回路は、図のようにして得られます。

すなわち、図のような回路を構成し、入力1のところにはゼロボルト信号を加え、また入力2のところにはSCRをONにしたときに0[V]になるような電圧を加えればよいのです。

このようにすると、回路はつぎのような動作をします。

- (1) 動作させたくないときには、入力2に高い電圧が加わっており、トランジスタのCE間がONとなっているため、入力1にゼロボルト信号を加えても、その電圧はSCRには加わりません。
- (2) しかし、入力2の電圧が0[V]になると、トランジスタのCE間がOFFとなるため、ゼロボルト信号が出力側に現れるようになります。

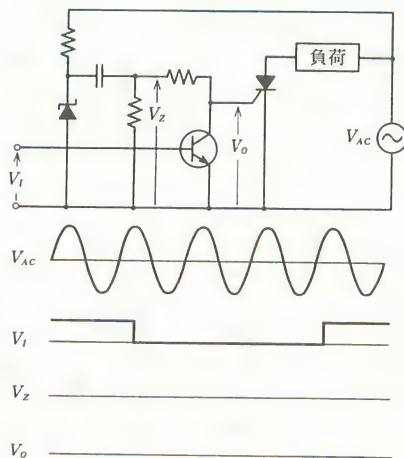


「トランジスタって  
いろんな回路が  
できるんだなあ」

「治療技術は  
あんなに頭いい  
はずヨ」

20 図の回路は、18フレームと19フレームの回路を利用してSCRをゼロボルト・スイッチ動作させた回路の一例です。

図のような電圧を加えたとき、各部の電圧波形がどのようになり、ゼロボルト・スイッチ動作をするのか、しらべてみてください。



「答は14フレームの  
波形図を参照して  
下さい」

## 練習問題

1 つぎの文章の \_\_\_\_\_ の中に適する言葉を入れ、文章を完成しなさい。

(1) PUTとは \_\_\_\_\_ ユニジャンクション・トランジスタの略

で、図のような図記号で示される半導体素子です。

(2) PUTでは、 $V_{AK}$  の電圧が  $V_{GK}$  よりも約  $0.7 \text{ [V]}$  高くなったときに(ア) \_\_\_\_\_ 間がONとなります。

そして、一度ONになったあとは、アノード電流を(イ) \_\_\_\_\_ 以下にすればもとのOFFになります。

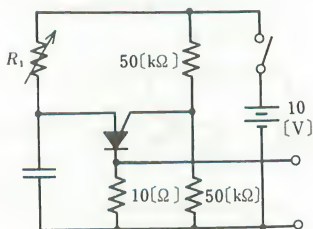
(3) ダイアックでは、ダイアック両端の電圧がある値を越えるとONの状態になりますが、この電圧のことを \_\_\_\_\_ 電圧といっています。



2 図の回路について、つぎの問いに答えなさい。

(1) PUTがONになるのは、AK間電圧がおよそ何ボルトになったときですか。

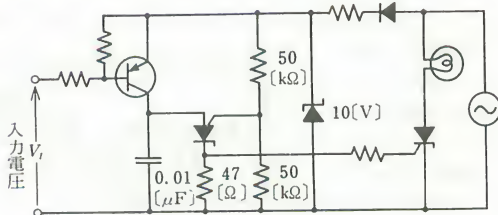
(2)  $R_1$  の値を小さくすると、スイッチをONにしてからトリガ・パルスが出る早さはどのように変わりますか。



3 図の回路について、つぎの問いに答えなさい。

(1) 入力電圧  $V_i$  が上昇すると、コンデンサへの充電電流の大きさはどのように変わりますか。

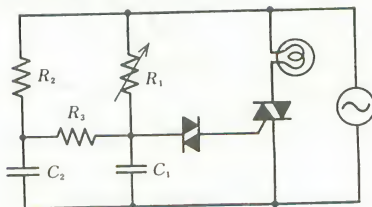
(2) 入力電圧  $V_i$  が上昇すると、ランプの明るさはどのように変わりますか。



4 図の回路について、つぎの問いに答えなさい。

(1)  $R_1$  の値を小さくすると、ランプの明るさはどのように変わりますか。

(2)  $R_2, R_3, C_2$  の回路は、なんのためにつける回路ですか。



## 9. オペアンプと比較機能

### 学習の目標

1. オペアンプとはどのようなものを学習し、その基本の応用として比較機能を学習する。
  - (1) オペアンプとは、どのような特性をもち、どのような働きをするものなのか。
  - (2) オペアンプをどのように利用すれば比較動作をさせることができるのか。
  - (3) オペアンプを使用するときには、どのようなことに注意する必要があるのか。
2. オペアンプを用いて比較動作をさせた基本応用事例について学習する。

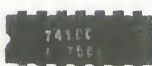




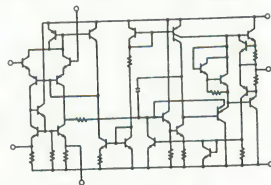
## 学習の概要

### 1. オペアンプ (Operational Amplifier)

- (1) オペアンプとは、演算増幅器とも呼ばれている集積回路で、図 a のような外観をしたものがあり、この中には図 b のような回路が組まれています。

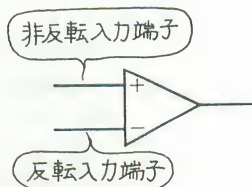


(図 a)

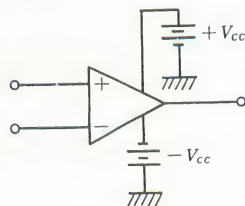


(図 b)

- (2) オペアンプは、つぎのように反転入力、非反転入力と呼ばれる二つの入力端子と、一つの出力端子をもつ一種の増幅器で、図のような図記号で示されます。



- (3) オペアンプは図のように、正負同一の大きさをもつ二つの電源 ( $V_{cc}$ ) を必要とし、一般にはこの電源に  $\pm 15[V]$  が使用されます。

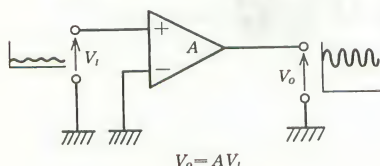


### 2. オペアンプの基本動作

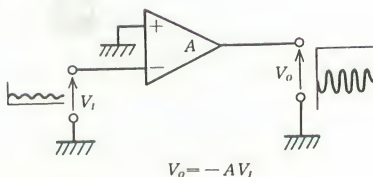
- (1) オペアンプは図 a のように、非反転入力端子に電圧を加えると出力には増幅度 ( $A$ ) 倍された同極性の出力が現れます。

また、図 b のように反転入力端子に電圧を加えると、出力には増幅度 ( $A$ ) 倍された逆極性の出力が現れます。

ただし、出力電圧が  $+V_{cc}$  以上や  $-V_{cc}$  以下になることはありません。電源電圧によって出力電圧は飽和してしまいます。

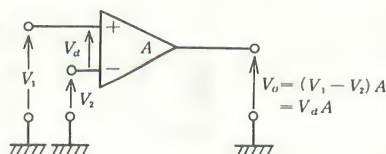


(図 a)



(図 b)

- (2) オペアンプの二つの入力端子に図のように同時に電圧を加えた場合は、非反転入力端子に加えている電圧 ( $V_1$ ) から反転入力端子に加えている電圧 ( $V_2$ ) を引いた値 ( $V_d$ ) を増幅度倍した出力が得られます。



### 3. オペアンプの特性と応用

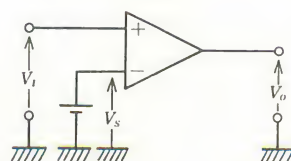
- (1) オペアンプは一種の増幅器ですが、つぎのような特性を理想として設計された増幅器です。

- 電圧増幅度 ( $A$ ) = 無限大
  - 増幅周波数帯域 = 無限大
  - 入力バイアス電流 ( $I_B$ ) = 0
  - 出力抵抗 = 0
- (入力抵抗 = 無限大)

- (2) オペアンプは増幅度が非常に高いということから、比較器として利用できます。

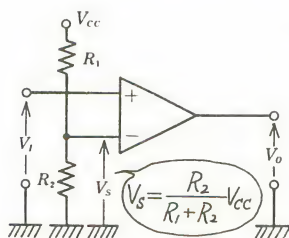
図の回路で  $V_1 = V_s$  の場合は出力が 0 [V] となりますが、すこしでも両者の間に差が生じると、出力電圧 ( $V_o$ ) はほぼ  $+V_{cc}$  か、または  $-V_{cc}$  となり、比較動作をするようになります。

- $V_1 > V_s$  のとき  $\Rightarrow V_o \doteq +V_{cc}$
- $V_1 = V_s$  のとき  $\Rightarrow V_o = 0$
- $V_1 < V_s$  のとき  $\Rightarrow V_o \doteq -V_{cc}$

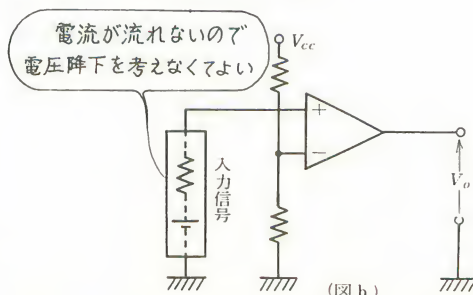


- (3) オペアンプは入力抵抗が非常に高く、バイアス電流がほとんど流れないということから、図 a のように比較器の基準電圧を設定する場合でも、抵抗の分割比だけで簡単に求めることができます。

また、図 b のように内部抵抗をもつ信号源を入力に接続する場合でも、この内部抵抗による電圧降下をあまり問題にする必要はありません。



(図 a)



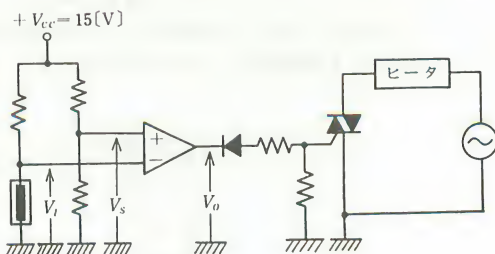
(図 b)

## 4. オペアンプの応用例

図の回路は、オペアンプを用いてサーミスタからの検出電圧を比較判定し、ヒータを ON-OFF 制御するための回路です。

(1)  $V_s$  よりも  $V_i$  が高くなると、 $V_o$  は約  $-15$  [V] となり、トライアックが駆動されます。

(2)  $V_s$  よりも  $V_i$  が低くなると、 $V_o$  は約  $+15$  [V] となり、トライアックは駆動されなくなります。

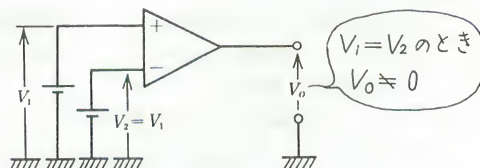


## 5. オペアンプ使用上の注意

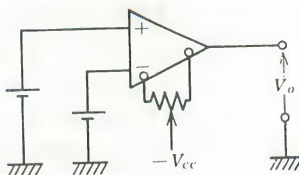
(1) 実際のオペアンプで

は、図のように入力電圧  $V_1$ 、 $V_2$  を同じ大きさにしても出力電圧が現れるようになります。

この現象をオフセットといっています。



(2) このオフセットに対する対策は、オペアンプの種類によっても異なりますが、一般にはオフセット・ヌルという端子がついており、この端子を図のように可変抵抗を通じて  $-V_{cc}$  に接続し、可変抵抗を調整することによって補正できるようにしています。



# 学習の展開

1 これまでの学習では、第一段階として1～5章ではトランジスタを中心にして電子制御の基本について、そして、第二段階として6～8章ではサイリスタを用いた電力制御について学習しました。

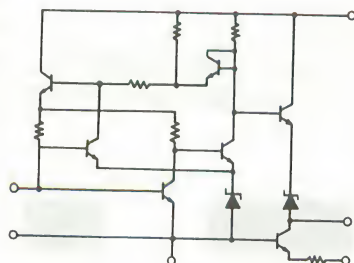
さあー  
スタートだ

2 いよいよこの章からは、第三段階の学習として、このような制御分野で最近非常によく使われ始めている集積回路を紹介し、その応用法について学習していきましょう。



「いよいよ  
第3段階ですね」

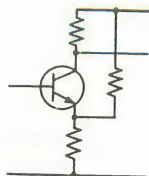
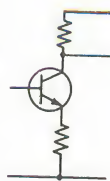
3 集積回路 (Integrated Circuit) とは、一般に IC と略されているもので、一つの素子の中に図のように数多くのトランジスタやダイオードを組み込み、高度な機能をもたせるようにした回路のことをいいます。



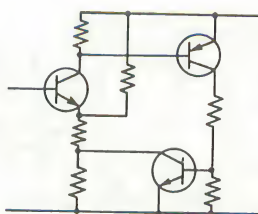
ウフエー  
大変な回路だなあ

「まあーネ」

4 いままでの学習では、検出器からの信号を電圧増幅する回路や、ON-OFF制御を行うためのシュミット・トリガ回路などをトランジスタを用いて構成していました。



電圧増幅回路



シュミット・トリガ回路

ハイ ハイ

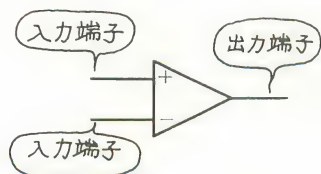
<p>5 ところで、これらの微弱な電流を取り扱う部分には、最近では集積回路が利用されるようになってきています。</p> <p>そして、トランジスタを取り扱う場合のようなめんどろさをほとんどなくし、基本のことさえ理解していればかなり自由にいろいろな機能をもった回路を簡単につくりあげることができるようになってきました。</p>	<p>へー ホットですか</p> <p>「ICの中身が面倒なりは 使いやすくするため なんですよ」</p>
<p>6 この章からは、このような集積回路の活用法について学習していきます。</p> <p>制御回路の分野で一般によく使われている集積回路には、いくつかの種類がありますが、本書ではこれらの中でとくに応用範囲が広いオペアンプと呼ばれている集積回路を代表的に取りあげ、その基本と活用法を学習していきたいと思います。</p>	<p>「オペアンプ」がわかれば その他についても、 大体わかるように なりますよ」</p>
<p>7 <b>オペアンプ</b></p> <p>オペアンプとは、正規にはオペレーショナル・アンプリファイア（演算増幅器）と呼ばれているもので、非常に応用範囲の広い一種の増幅器で、つぎのようにいろいろな外観をしたものがあります。</p> <div data-bbox="232 885 300 997" data-label="Image"> </div> <div data-bbox="408 906 560 970" data-label="Image"> </div> <div data-bbox="660 906 744 970" data-label="Image"> </div>	<p>おかでっように 足がでているなあ</p> <p>「まあまあ そう いわないて」</p>
<p>8 オペレーショナル・アンプリファイア（演算増幅器）という名称は、当初開発された目的がアナログ・コンピュータの演算回路に用いるためのものであったことから、このような名称がつけられたわけです。</p> <p>図の回路は、オペアンプの内部等価回路です。</p> <div data-bbox="330 1173 789 1444" data-label="Diagram"> </div>	<p>中身は考えなくて いいのですか</p> <p>「次のフレームへ どうぞ」</p>



9 オペアンプの内部は非常に複雑な回路になっていますが、基本的には図のように+および-と表示された二つの入力端子と、一つの出力端子をもつ増幅器と考えることができます。

そして、オペアンプはつぎのような図記号で表示して取り扱っています。

本書では、オペアンプ内部の回路動作は取りあげず、基本動作と活用面を中心に学習していきたいと思います。

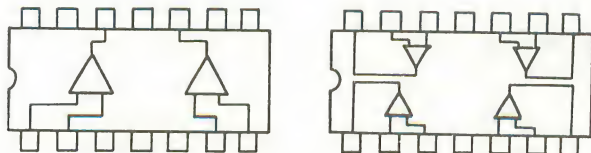


へーフ

すごく 簡単に  
なるんだなあ

「トランジスタよりも  
取り扱いやすい  
感じてしょ」

10 ところで、オペアンプ IC には、一つのパッケージの中にこのオペアンプが一つだけでなく、つぎのように複数個はいったものがあります。



ウフエー

ICって すごいなあ

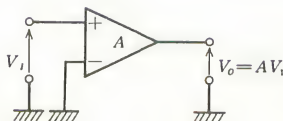
「両方の進歩を  
感じるでしょ」

11 それではまず、オペアンプの二つの入力端子にどのように電圧を加えると、どのような出力が出てくるのかという、入出力の関係から学習していきましょう。

オペアンプには図のような+、-と表示された二つの入力端子がありますが、これら二つの入力端子の利用のしかたによって、いろいろな出力が得られます。

いま、このオペアンプの増幅度を  $A$  とすると、入力端子の使い方に応じてつぎのような出力が現れます。

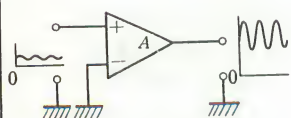
図のように、プラスと表示された入力端子に電圧を加えた場合には、その出力端子には  $A$  倍の同極性の電圧が現れます。



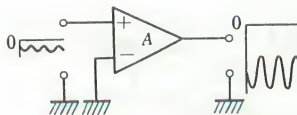
フン フン

増幅度が  $A$  倍 だから  
 $A \cdot V_i$  というわけか

12 つまり、図のように+と表示された入力端子に電圧を加えると、図 a のように正の電圧を加えた場合は A 倍された正の出力電圧が出ますし、また、図 b のように負の電圧を加えた場合は、A 倍された { (ア) 正 }  
{ (イ) 負 } の出力電圧が出るわけです。



(図 a)



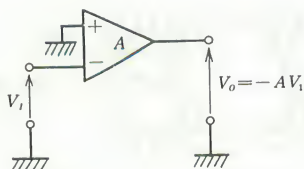
(図 b)

(イ) 負

フン フン

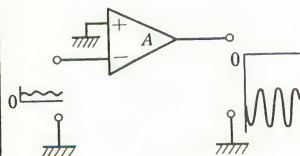
ナルホド  
ナルホド

13 また、図のように-と表示された入力端子に電圧を加えた場合は、その出力端子には A 倍の逆極性の電圧が現れます。

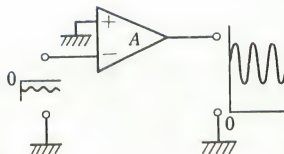


オヤ オヤ  
どっちに 入力を  
加えても いいのですか  
「そくですよ  
どっちも  
入力端子なのです」

14 つまり、図のように-と表示された入力端子に電圧を加えると、図 a のように正の電圧を加えた場合は A 倍された負の出力電圧が出て、図 b のように負の電圧を加えた場合は A 倍された { (ア) 正 }  
{ (イ) 負 } の出力電圧が出るわけです。



(図 a)



(図 b)

(ア) 正

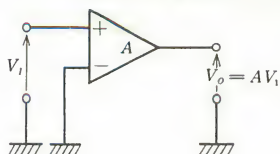
出力が逆転するわけだな

「そくいっこと！」

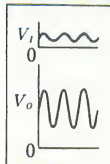
15 すなわち、プラスと表示された入力端子に電圧を加えると、その出力端子には同極性の増幅された電圧が現れ、またマイナスと表示された入力端子に電圧を加えると、その出力端子には、反転した極性の増幅された出力が現れるわけです。

逆

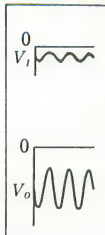
(1) プラス入力に電圧を加えた場合



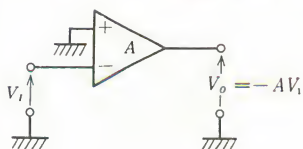
$V_i$  が正のとき



$V_i$  が負のとき



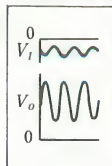
(2) マイナス入力に電圧を加えた場合



$V_i$  が正のとき



$V_i$  が負のとき

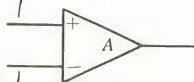


⊕入力端子は同極,  
⊖入力端子は反転した  
出力か? という  
わけだな

「そう いう こと」

16 このようなことから、プラスと表示された入力端子を、出力が反転しない入力端子ということで非反転入力端子といい、マイナスと表示された入力端子を、出力が反転する入力端子という意味で反転入力端子といっています。

非反転入力端子

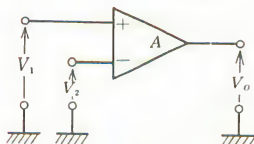


反転入力端子

非反転入力のことを  
NON INVERTING  
INPUT,  
反転入力のことを  
INVERTING INPUT  
ともいいます。

17 それでは、図のように非反転入力端子にも反転入力端子にも電圧を加えた場合はどのようなのでしょうか。

このように二つの入力端子に電圧を加えても、オペアンプは正常に動作します。

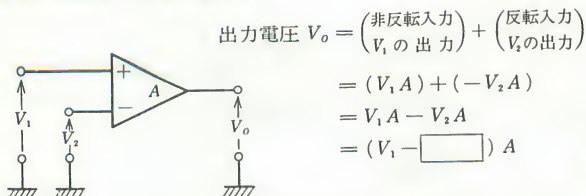


ナニッ!

こんどは 両方共に  
入力を 加えるんですか。

18 このように非反転入力端子と反転入力端子の両方に電圧を加えた場合は、その出力電圧には、それぞれの入力電圧が増幅され、合された値となって現れてきます。

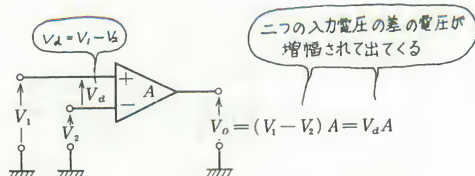
すなわち、図の回路の場合、入力電圧  $V_1$ 、 $V_2$  に対して、出力電圧  $V_o$  はつぎのようになります。



「 $V_o$  の式の意味を  
よく考えて」

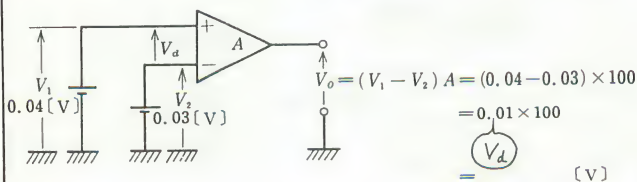
$V_2$

19 つまり、オペアンプは非反転入力端子に加えた入力電圧から反転入力端子に加えた入力電圧を引いた値（差の電圧  $V_d$ ）を増幅する働きをすることになります。



ナルホド  
結果的には、 $V_1$  と  $V_2$  の差の  
電圧を、増幅していること  
になるわけだ

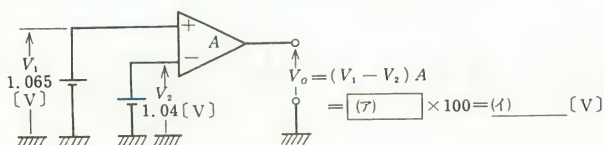
20 したがって、たとえばオペアンプの増幅度を100とすると、図のような入力電圧を加えた場合の出力電圧はつぎのようになります。



1

ナルホド  
ナルホド

21 また、同じオペアンプ ( $A = 100$ ) で入力電圧をつぎのように変えた場合の出力電圧はつぎのようになります。



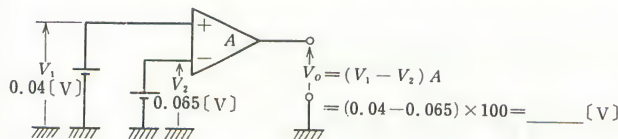
(ア) 0.025

(イ) 2.5

ポイントは  
入力電圧の差だ

「そう いう こと」

- 22 さらに、図のようにプラス側の入力電圧がマイナス側の電圧より低い場合でも、まったく同じようにして出力電圧を計算できます。  
たとえば、図のように非反転入力端子に0.04[V]、反転入力端子に0.065[V]を加えたときの出力は、つぎようになります。

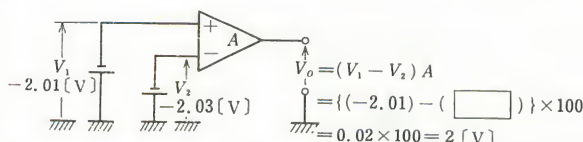


-2.5

忠実に計算すれば  
いいわけだ

「そうです  
演算増幅器です」

- 23 また、図のように負の入力電圧を加えている場合も同じです。

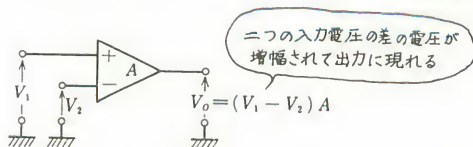


-2.03

フン フン

- 24 すなわち、オペアンプの二つの入力端子にそれぞれの電圧を加えた場合には、その出力端子には、それぞれの入力端子の差の電圧が増幅されて現れることになります。

このような二つの入力端子間の差の成分を増幅するような増幅器を差動増幅器といっていますが、オペアンプは基本的にはこのような差動増幅器で構成されているのです（トランジスタを用いた具体的な差動増幅器の回路については、「電子回路編Ⅱ」で扱っていますので参照してください）。



ウーン

これは いくんな使い方が  
ありそうです

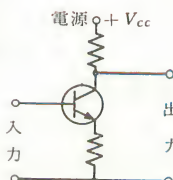
「大いに活用して  
下さいヨ」

ハイ

- 25 オペアンプの基本動作は理解できましたか。

ところで、トランジスタ回路の場合にも、トランジスタ回路を動作させるためには電源電圧を必要としました。

これはオペアンプの場合でもまったく同じことで、オペアンプを動作させるためには電源を必要とします。

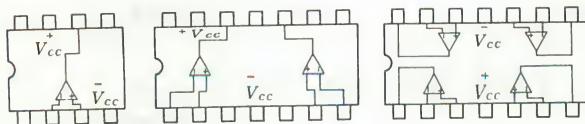


「IC といっても  
中身はトランジスタ  
ですからネー」



26 ただし、オペアンプでは、一般のトランジスタ増幅器とちがって、プラスとマイナスの同一の電源が必要となります。

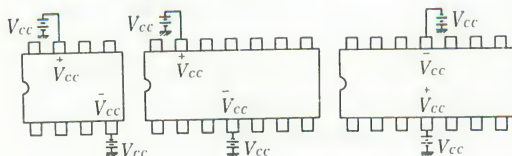
これらの電源を接続する端子は、オペアンプのカタログに必ず明記されています。



フン フン  
電源が2つ  
いるわけですね。

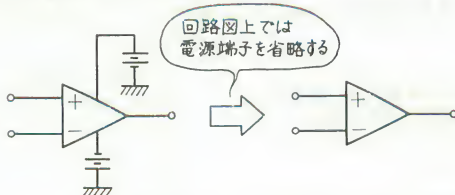
27 すなわち、オペアンプを動作させるためには、これらの端子に図のように同一の大きさをもつプラスとマイナスの電圧を加える必要があります。

このようにして電源電圧を加えると、ICの内部回路は動作状態となり、増幅動作を始めるようになります。



28 このことを回路図上で示す場合には図のように表示しています。

しかし、ICに電源が必要なことは当然のことですから、通常、回路図上では省略しています。

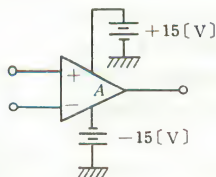


「実際の配線では省略しちゃダメですぞ」

29 ところで、この電源電圧はいくらでもいいというわけではありません。

一般のオペアンプの場合には、この電源電圧を±15[V]にして動作させるようにしています。

この上限値には制限がありますから、使用するオペアンプのカタログを参照して、まちがいのないようにしてください。



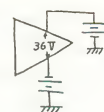
OK!

30 つぎの表は一般によく使われている  $\mu A741$  というオペアンプの電源電圧の最大定格値です。

この最大定格値は、オペアンプの二つの電源端子間に加わる電圧  $\{(+V_{cc}) - (-V_{cc})\}$  で示していますから、実質的には  $\pm 18[V]$  以上を加えてはいけないということになります。

$\mu A741$  (最大定格)

電源電圧	36 [V]
------	--------

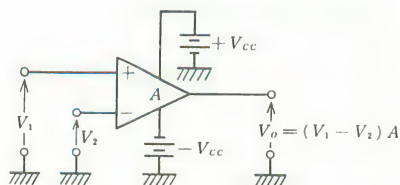


ということですね

「そう いう こと」

31 オペアンプは基本的には差動増幅器で構成されており、図のように等しい大きさの電源電圧  $+V_{cc}$  と  $-V_{cc}$  とを加えておいて、二つの入力端子に電圧を加えると、その差の成分が増幅されて出力に現れることになります。

このことは、もうじゅうぶんに理解できましたね。



OK, OK,  
 $V_1 - V_2$  を  
増幅するわけでしょ

「そう いう こと」

32 さて、オペアンプは単にこのように差の成分を増幅するということだけではありません。

二つの入力の差の成分を増幅するという基本的な働きは変わりませんが、広い範囲に応用しやすいように、いろいろな特徴をもっています。

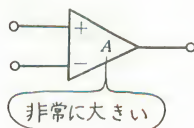
ホー  
どんなことかな

「次のフレームへ  
どうぞ」

### 33 オペアンプの特徴

まず、オペアンプの第一の特徴は、増幅度 ( $A$ ) が非常に大きいということです。

理想的には無限大という特性が望ましいわけですが、 $\mu A741$  を例にとると、つぎの表のように代表値で \_\_\_\_\_ の増幅度をもっています。



$\mu A741$ の 増 幅 度	min.	typ.	max.
	25,000	200,000	—

200,000

ウェー  
スゴく  
大きいなあ

34 さて、さきほど考えた差動増幅器がこのように非常に大きな増幅度をもっているとする、その動作はどのようなになるでしょうか。

いま、図のように反転入力端子には  $V_2 = 1\text{ [V]}$  の一定電圧を加えておいて、非反転入力端子の電圧  $V_1$  を変化させた場合、オペアンプの増幅度を  $10^5$  としたときに出力電圧  $V_o$  がどのようなかを求め、グラフに示してみてください。

$$V_1 = 0.9999\text{ [V]} \text{ のとき} \Rightarrow V_o = (\text{ア}) \text{ [V]}$$

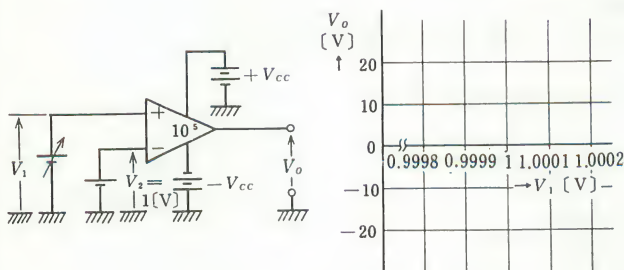
$$V_1 = 1.0000\text{ [V]} \text{ のとき} \Rightarrow V_o = (\text{イ}) \text{ [V]}$$

$$V_1 = 1.0001\text{ [V]} \text{ のとき} \Rightarrow V_o = (\text{ウ}) \text{ [V]}$$

(ア) -10

(イ) 0

(ウ) +10

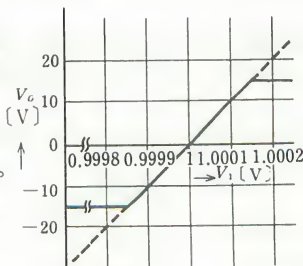


「答」は次のフレーム」

35 単に入力電圧を  $10^5$  倍した出力を示すと、図の破線のようにになりますが、実際には正の電源電圧以上や、負の電源電圧以下の出力は出ませんから、出力は  $+V_{cc}$  と  $-V_{cc}$  の値で飽和してしまいます。

すなわち、電源に  $\pm 15\text{ [V]}$  を使用しているときは図のようになり、二つの入力端子間にわずか  $0.15\text{ [mV]}$  程度の電位差ができると、出力はもう飽和して  $+15\text{ [V]}$  か  $-15\text{ [V]}$  になってしまうわけです。

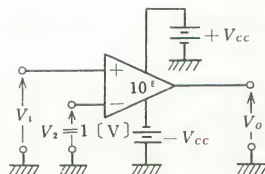
（実際には出力が飽和したときの出力電圧は  $+V_{cc}$  や  $-V_{cc}$  よりもすこし小さくなりますが、本書では理解しやすくするために  $+V_{cc}$  や  $-V_{cc}$  が出るとして取り扱っていきます。



フーン

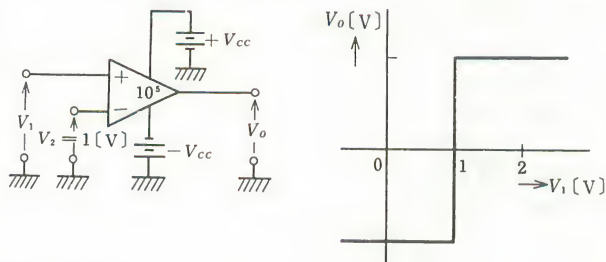
わずか  $0.15\text{ [mV]}$  の差だけで  
出力は飽和してしまうのや

「増幅度が  
スゴイからネー」



36 このことからわかるように、オペアンプの二つの入力端子に電圧を加えた場合、その差が完全に  $0\text{ [V]}$  であれば出力は  $0\text{ [V]}$  となっていますが、すこしでも電位差 ( $V_d = \pm 0.15\text{ [mV]}$  程度以上) があると、出力は  $+V_{cc}$  か  $-V_{cc}$  かのどちらかに \_\_\_\_\_ することになります。

いままでのグラフは横軸を拡大していましたが、この特性を拡大せずに示すと図のようになります。

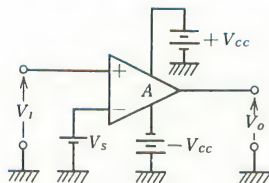


飽和

すると、 $0.15\text{ [mV]}$  以上は  
加えられないと  
いうことかな

「この特性をうまく  
活用するんだヨ」

37 では、図のようにオペアンプの入力的一方に基準電圧  $V_s$  を与え、他方に入力電圧  $V_i$  を加えるとどうでしょうか。



$0.15\text{ [mV]}$  以上の差があると、  
ダメなわけだしよ

「次のフレームへ  
どうぞ」

38 図のようにオペアンプの入力端子の一方に基準電圧  $V_s$  を加えておくと、入力電圧  $V_i$  が基準電圧  $V_s$  に対してすこしでも大きければ (ア) \_\_\_\_\_ を出力しますし、すこしでも小さければ (イ) \_\_\_\_\_ を出力するというようになります。

(ア)  $+V_{cc}$

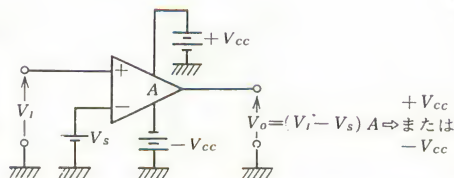
(イ)  $-V_{cc}$

すなわち、このような回路の動作は、基準電圧に対して入力の電圧が大きい小さいかを判定しているというように考えることもできます。

つまり、オペアンプは比較器としての働きをしていることになります。

○  $V_i > V_s$  のときは  
 $V_o = +V_{cc}$

○  $V_i < V_s$  のときは  
 $V_o = -V_{cc}$



ナルホドなあー

発想の転換だな

「おもしろいでしょ」



39 オペアンプは、その名のとおり「増幅器」としてそのまま活用できそうな気がしますが、実際にはオペアンプ単体では増幅度が高すぎて回路が不安定になったり、バラついたりして使用できません。

つぎの値は $\mu A741$ の増幅度ですが、typ.で200,000、min.で25,000というように10倍程度のバラツキがあります。

したがって、オペアンプ単体の用途としては、一般に、いま述べたように比較回路として利用されているのです。

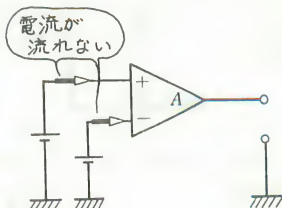
 $\mu A741$ 

増幅度	min.	typ.	max.
	25,000	200,000	—

「何事も  
使い方がすよ！」

40 それでは、オペアンプの二番目の特徴にはいりましょう。

それは、オペアンプは入力抵抗が非常に高く、図のように入力電圧を加えてもオペアンプにはほとんど電流が流れないということです。



フーレ  
トランジスタのベース電流  
のように、電流が流れ  
ないと いくことですか

「そくですよ」

41 この電流を入力バイアス電流といっていますが、 $\mu A741$ の場合をみても、つぎのように非常に小さな値になっています。

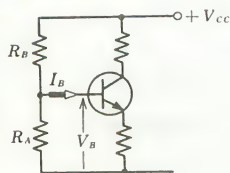
$\mu A741$ の 入力バイアス電流	min.	typ.	max.
	—	80 [nA]	500 [nA]

「[nA]とはナノアンペア  
と呼び  $\frac{1}{10^9}$  [A]  
のことです」

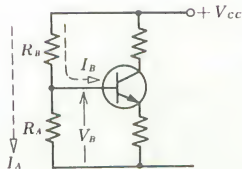
ウフエー

42 トランジスタの場合には、図 a のように  $V_{cc}$  を抵抗  $R_A$ 、 $R_B$  で分圧して  $V_B$  をつくるときにも、ベース電流  $I_B$  を考慮に入れて取り扱わなければなりません。

すなわち、 $V_B$  の値をトランジスタに無関係に設定するためには、図 b のように  $I_B$  に対して  $I_A$  の値をじゅうぶん { (ア) 大きく } とる必要がありました。



(図 a)



(図 b)

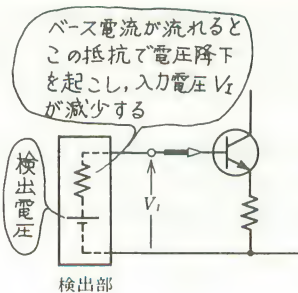
(ア) 大きく

フン フン  
 $I_B$  によって  $R_A$  や  $R_B$  の  
電圧降下に変化を与えない  
ようにするためだった  
ですね。

「そく いく こと」

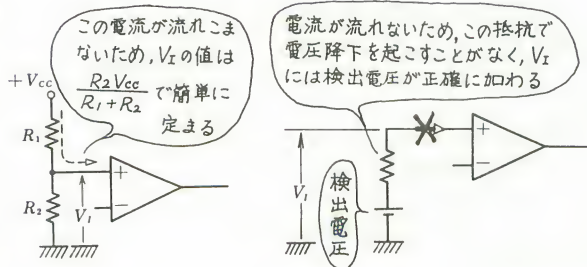


43 また、トランジスタに検出器からの信号を加える場合も、検出器の内部抵抗によって電圧降下が発生し、検出電圧が増幅器の入力に正確に加わらなくなる場合があります。



44 しかし、オペアンプの場合には入力抵抗が非常に高く、オペアンプに流れこむ電流がほとんど 0 という小さな値です。

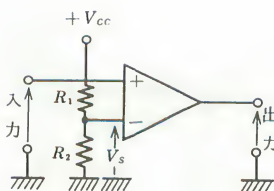
したがって、バイアス電流による問題点をほとんど考慮する必要がないわけです。



なまほむナアー  
こしや 便利だぞ

「どうです  
使いやすいでしょ」

45 たとえば、比較動作をさせる場合に、図のように基準電圧  $V_s$  を抵抗分割で得るときにも、抵抗比だけを考えればよいのですから、非常に簡単になります。



「基準電圧の値は  
どうなるかな」

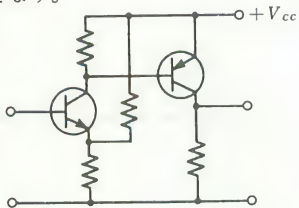
簡単、簡単、

$$V_s = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{cc}$$

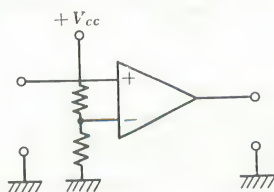
でしょ

46 オペアンプの増幅度が非常に高く、比較回路として簡単に応用できることや、バイアス電流が非常に小さいということから、基準電圧を定める場合などの回路計算がらくであるということがわかったと思います。

トランジスタ回路でこのような比較動作を得ようとする、図 a のようにかなりめんどろなことになりますが、このようにオペアンプを用いると図 b のように非常に簡単に比較回路をつくるができます。



(図 a)



(図 b)

ウーシ  
これは 便利だナア

「これから  
大いに 活用して  
下さいヨ」

47 オペアンプの特徴と、その特徴を利用した比較機能への応用については、理解できましたか。

オペアンプには、このほかにもつぎのような特徴がありますが、これらについてはまた次章で学習します。

- 出力抵抗が非常に小さい
- 増幅周波数帯域が非常に広い。

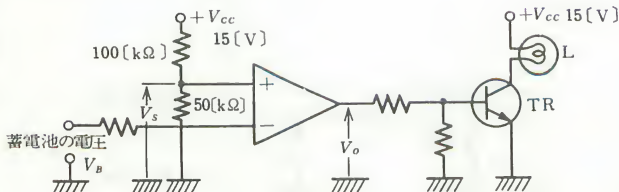
「次章をおたのしみに  
ネ!」

48 さて、ではこのようなオペアンプの比較機能がどのようなところで応用されているのかを、すこしみていきましょう。

図の回路は蓄電池の電圧をチェックし、 $V_s$ 以下の電圧になるとランプを点灯して表示させるための回路です。

この回路では  $V_s$  が(ア) [V] となりますから、蓄電池の電圧によってつぎようになります。

(ア) 5



フン フン  
バッテリーチェッカー  
だな

- (1)  $V_B < 5 [V]$  のとき  $\Rightarrow V_o \approx +15 [V] \Rightarrow \text{TR「ON」} \Rightarrow \text{L 点灯}$
- (2)  $V_B > 5 [V]$  のとき  $\Rightarrow V_o \approx$  (イ) [V]  $\Rightarrow \text{TR(ウ)} \Rightarrow \text{L(エ)}$

(イ) -15

(ウ) OFF

(エ) 消灯

49 また、図の回路はオペアンプを二つ用いて、入力電圧がある範囲の電圧以上や以下になったときにそれを表示させる回路です。

(1) 入力電圧  $V_i$  が  $V_{s1}$

以下になると、 $V_{o1}$  が

(ア) \_\_\_\_\_ になって

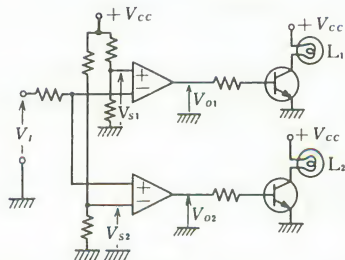
$L_1$  が点灯します。

(2) 入力電圧  $V_i$  が  $V_{s2}$

以上になると、 $V_{o2}$  が

(イ) \_\_\_\_\_ になって

$L_2$  が(ウ) \_\_\_\_\_ します。



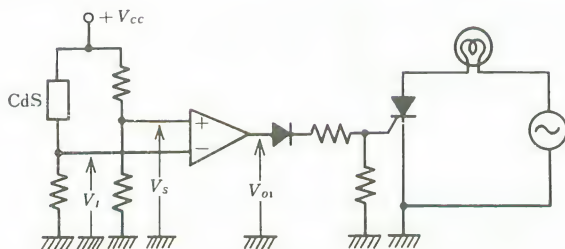
(ア)  $+V_{cc}$

(イ)  $+V_{cc}$

(ウ) 点灯

50 つぎの回路は、CdSを用いて光の強さを検出し、その検出電圧が基準電圧 ( $V_s$ ) 以下になると SCR を駆動してランプを点灯させようとする回路です。

この回路では、暗くなって検出電圧  $V_i$  が  $V_s$  よりも低くなれば出力電圧 ( $V_{o1}$ ) が \_\_\_\_\_ [V] となって、SCR が駆動されるようになります。



15

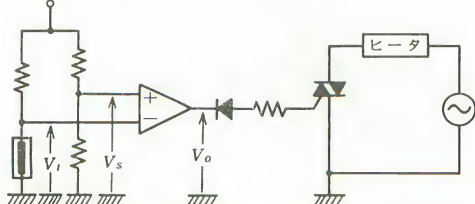
「門灯や 街路灯 などの  
自動点滅器に  
利用できますね」

51 また、図の回路は温度を検出し、その検出電圧が設定値以上のときはトライアックを駆動してヒータを働かせようとする回路です。

図の回路では、温度が { (ア) 上昇 }  
{ (イ) 低下 } するとトライアックが駆動されます。

(イ) 低下

$+V_{cc} = 15 [V]$



「トランジスタを  
使うより 簡単でしょ」

52 ところで、いままでの学習ではオペアンプの比較動作を中心に学習してきましたが、この回路をすこしくふうすると、ほかにもいろいろな応用機能をもたせることができます。

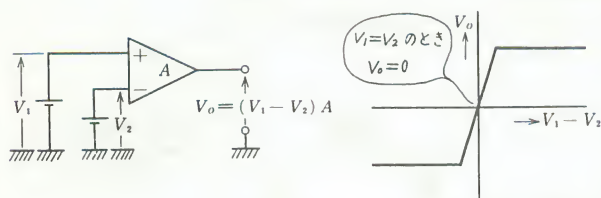
このような活用法については、10章以降でさらに取りあげていきたいと思います。

これは  
楽しみだねー

53 それでは最後に、オペアンプを使用するうえで注意しなければならない点について学習しておきましょう。

#### 54 オペアンプ使用上の注意

いままでは、図のようにオペアンプの入力電圧に差がない場合は、出力電圧が \_\_\_\_\_ [V] となり、入力電圧に差がでくると、その差が  $A$  倍され、出力電圧が正や負の方向に増加していくとして学習してきました。



0

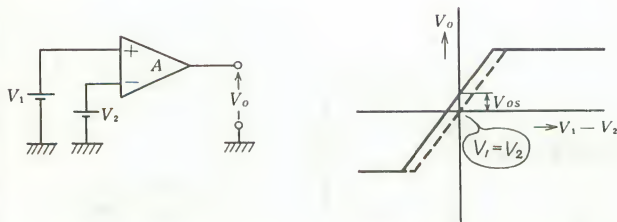
そうじゃ ないのですか

「まあーネ」

55 しかし、実際にはそううまく働いてはくれません。

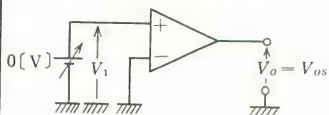
オペアンプも半導体ですから、バラツキや温度に対する弱点はやはりあるわけです。

実際には、入出力特性が図の実線のように原点からすこしズレており、入力電圧に差がない状態 ( $V_1 = V_2$ ) でも出力に  $V_{os}$  [V] の出力電圧を出す場合があります。

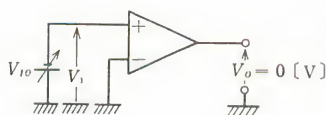


56 すなわち、図のように一方の入力を接地して、 $V_1$ の電圧を正負に変化させたとき、 $V_1 = 0$ としても出力電圧として  $V_{os}$  [V] が現れるわけです。

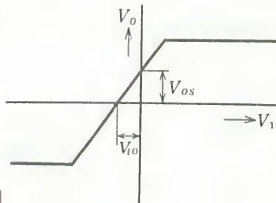
そして、図 c のように  $V_1 = 0$  でなく、 $V_1 = \underline{\hspace{2cm}}$  のときに出力電圧が 0 [V] になるわけです。



(図 a)



(図 b)



(図 c)

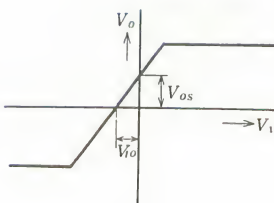
$-V_{io}$

オプアンプ

こうなると  
面倒ななあ

57 このように出力電圧が 0 [V] となる入力電圧の位置が原点からズレている現象をオフセットといい、また、この入力電圧のズレ  $V_{io}$  の値を入力オフセット電圧といっています。

そして、この入力オフセット電圧が温度などの周囲の条件で変化する現象を一般にドリフトと呼んでいます。



温度によっても  
影響を受けるとはですか

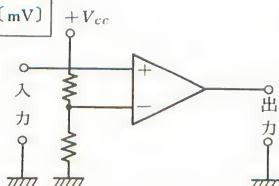
「なにぶん 温度に弱い  
半導体 ですからね」

58 つぎの表は、 $\mu A741$  の入力オフセット電圧の値です。

図のようにオペアンプに比較動作をさせている場合は、この値が直接、誤差となって現れてきます。

$\mu A741$

入力オフ セット電圧	min.	typ.	max.
—	—	1.0 [mV]	6.0 [mV]

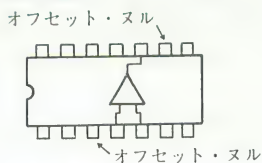


ファン ファン  
原点がズレてるん  
だからなあー



59 オペアンプを用いる場合、この入力オフセット電圧による誤差が機能上問題なければいいわけですが、この値が無視できないほどの精度が要求されるときには、対策を考えなければなりません。

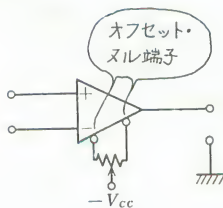
一般にオペアンプには、図のようにオフセット・ヌルという端子がついており、これを用いて解決できるようになっています。



「<sup>ヌル</sup>NULL」とは  
ゼロ という意味です」

「なるほど  
オフセット電圧を  
0にする端子という  
ことだね」

60 これらの端子をどうするのかということについては、ICの種類によって異なるため通常はICのカatalogに明記されていますが、一般的な取り扱いを示しておけば、図のようにオフセット・ヌルという二つの端子のところに可変抵抗を接続し、その中間端子を  $-V_{cc}$  に接続して、入力電圧が0のときに出力電圧が0になるように可変抵抗を調整することによってオフセット電圧が0になるようコントロールしています。

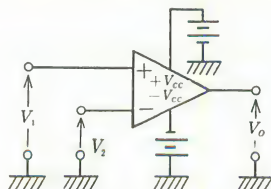


「オフセット が気に  
なるときは、  
利用して下さい」

「どうも ご苦労さん  
でした」

# 進んだ学習：オペアンプの単電源動作

1 いままでの学習では、オペアンプを動作させるためには図のように正負同一の大きさをもつ二つの電源が必要だとして学習してきました。

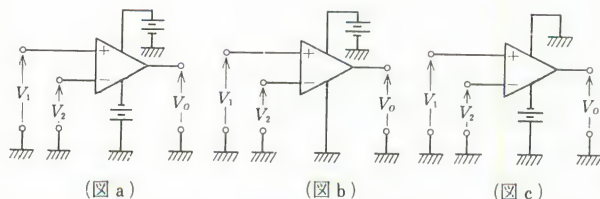


ハイ ハイ  
± 15[V] では  
「通常はネ」

2 ところで、オペアンプは図 a のように二つの電源を用いなくても、図 b や図 c のように一つの電源だけで動作させることもできます。

図 b は  $-V_{cc}$  を加える端子を接地して、 $+V_{cc}$  側にだけ電圧を加えています。

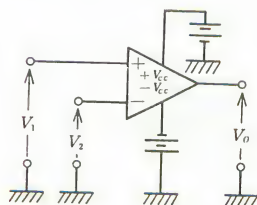
また、図 c は  $+V_{cc}$  を加える端子を接地して、 $-V_{cc}$  側にだけ電圧を加えています。



ホー  
一つの電源だけで  
働かせることも  
できるんですか  
これは 便利だなあ  
「ケレ 無理があふけど  
使いかたによってはネ」

3 このように一つの電源だけで動作させることを単電源動作をさせるといっていますが、このようにすると、つぎのような動作をするようになります。

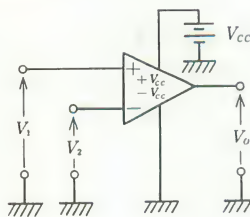
図のように  $+V_{cc}$  と  $-V_{cc}$  の二つの電源を接続している場合には、二つの入力端子間の差の電圧 ( $V_a = V_1 - V_2$ ) を 0 [V] にすると出力電圧も \_\_\_\_\_ [V] になりました。



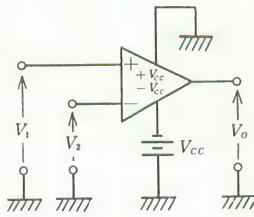
0  
フン フン

4 ところで、図のように一つの電源だけで動作させた場合の出力電圧は、二つの入力端子間の差の電圧  $V_d$  が  $0[V]$  のときには、加えた電源電圧の  $1/2$  になります。

図 a の場合は  $V_o = \frac{1}{2} V_{cc}$  となり、図 b の場合は  $V_o = -\frac{1}{2} V_{cc}$  となります。



(図 a)



(図 b)

$V_d$  が  $0[V]$  のときには  
電源電圧が二等分されて  
出てくるわけかな

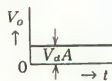
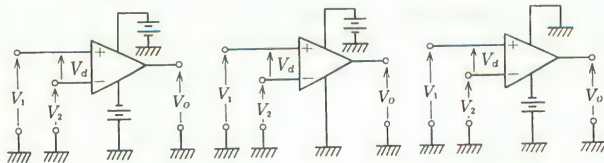
「実際には  
オペアンプの増幅度が  
非常に大きく、  
オフセットもあります  
から、このような現象  
をみることは、  
困難だけじゃね」

5 そして、図 a の場合は  $V_d$  の値が  $0[V]$  でなくなると、この  $V_d$  を  $A$  倍した出力電圧が出てきました。

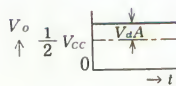
しかし、図 b や図 c の場合は、図のように  $V_d = 0[V]$  のときの出力電圧を中心にして、そこから  $V_d A$  を加えた値の出力が出るようになるわけです。

このような使い方は変則的ですから、いままで何も説明しなかったのですが、オペアンプは二つの電源端子間に加えられた電圧の中心値で動作するわけです。

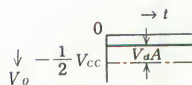
したがって、図 a の場合は  $+V_{cc}$  と  $-V_{cc}$  との中心値である  $0[V]$  で動作し、図 b や図 c の場合は  $+V_{cc}$  か  $-V_{cc}$  だけを加えているので、それぞれの電源電圧の中心値である  $\frac{1}{2} V_{cc}$ 、または  $-\frac{1}{2} V_{cc}$  を中心として動作するわけです。



(図 a)



(図 b)



(図 c)

ナールホド  
オペアンプは 中間分極?

「ホー うまくいきますネ」

「そして、ボール(入力)が  
くると、その位置から  
動くわけだ……」

6 しかし、いままでに学習した比較回路としてはじゅうぶん実用的なものとなります。

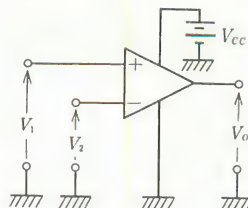
図のように単電源動作をさせて、二つの入力端子に電圧  $V_1$ 、 $V_2$  を加えると、これらの大小によってつぎのように  $+V_{cc}$  や  $0[V]$  の出力を出すようになります。

(1)  $+V_{cc}$  だけで動作させた場合

$$V_1 = V_2 \text{ のとき } \Rightarrow V_o = \frac{1}{2} V_{cc}$$

$$V_1 > V_2 \text{ のとき } \Rightarrow V_o = +V_{cc}$$

$$V_1 < V_2 \text{ のとき } \Rightarrow V_o = \text{(ア)}$$



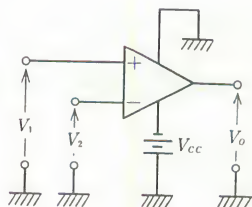
(ア)  $0[V]$

(2)  $-V_{cc}$  だけで動作させた場合

$$V_1 = V_2 \text{ のとき } \Rightarrow V_o = \frac{1}{2} V_{cc}$$

$$V_1 > V_2 \text{ のとき } \Rightarrow V_o = \text{(イ)}$$

$$V_1 < V_2 \text{ のとき } \Rightarrow V_o = \text{(ウ)}$$



(イ)  $0[V]$

(ウ)  $-V_{cc}$

フン フン  
「ふんふん」

7 また、このように単電源動作をさせた場合には、入力電圧  $V_1$  もつぎの範囲内にする必要があります。

○  $+V_{cc}$  だけの場合……  $0[V] < V_1 < V_{cc}$

○  $-V_{cc}$  だけの場合……  $0[V] > V_1 > -V_{cc}$

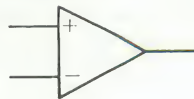
入力電圧を電源電圧  
範囲内にする必要がありますね。

「そう いふ こと」

## 練習問題

1 つぎの文章の \_\_\_\_\_ の中に適する言葉を入れ、文章を完成しなさい。

- (1) 図はオペアンプの図記号を示していますが、ここで—と表示されている端子を(ア) \_\_\_\_\_ 端子といい、+と表示されている端子を(イ) \_\_\_\_\_ 端子といいます。
- (2) オペアンプは、つぎのような特性を理想とした一種の増幅器です。



○増幅度が(ア) \_\_\_\_\_。

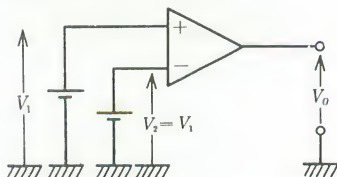
○増幅周波数帯域が無限大

○入力バイアス電流が(イ) \_\_\_\_\_。

○出力抵抗が0

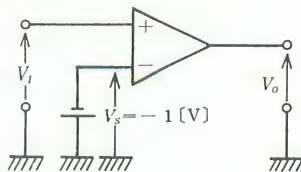
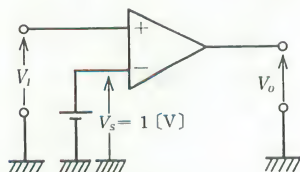
- (3) 図のようにオペアンプの二つの入力端子に加わる電圧を等しくしても、実際には出力電圧が現れます。

この現象を \_\_\_\_\_ といっています。



- 2 つぎのそれぞれの回路で、入力電圧  $V_i$  をつぎのようにしたとき、出力電圧  $V_o$  はおおよどのような値になりますか。

ただし、オペアンプの増幅度は無限大とし、電源電圧は $\pm 15[V]$ を使用しています。



$V_i < 1[V]$  のとき  $V_o =$  (ア) \_\_\_\_\_  $[V]$

$V_i > -1[V]$  のとき  $V_o =$  (ウ) \_\_\_\_\_  $[V]$

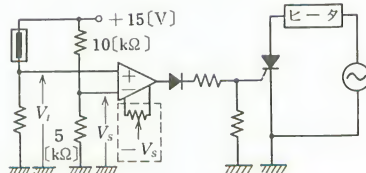
$V_i > 1[V]$  のとき  $V_o =$  (イ) \_\_\_\_\_  $[V]$

$V_i < -1[V]$  のとき  $V_o =$  (エ) \_\_\_\_\_  $[V]$

- 3 図の回路は、サーミスタからの検出電圧をオペアンプで判定し、ヒータを ON-OFF 制御しようとしている回路です。

つぎの問いに答えなさい。

- (1) 破線で囲んだ部分は何をするための回路ですか。
- (2)  $V_s$  の値はいくらになりますか。
- (3)  $V_i$  がつぎのようになったとき、ヒータはどのようにになりますか。
- $V_s > V_i$  のとき  $\Rightarrow$  ヒータは(ア) \_\_\_\_\_
- $V_s < V_i$  のとき  $\Rightarrow$  ヒータは(イ) \_\_\_\_\_

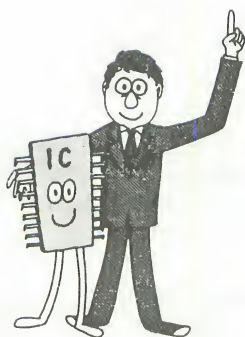




## 10. オペアンプの活用法(I)

### 学 習 の 目 標

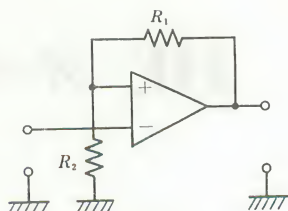
1. オペアンプに帰還をかけたときの回路動作について学習する。
  - (1) 帰還のかけ方には、どのような種類があるのか。
  - (2) 正帰還や負帰還をかけると、回路動作はどのようなになるのか。
  - (3) 正帰還動作や負帰還動作をどのようなところに応用できるのか。
2. オペアンプに帰還をかけたときの動作の応用として、シュミット・トリガ回路や、増幅回路について学習する。



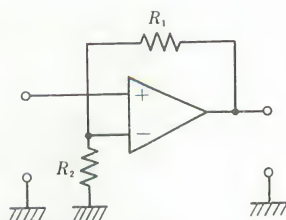
## 学習の概要

### 1. オペアンプの帰還動作

- (1) 図 a や図 b のように、出力電圧の一部を入力側にもどすことを帰還をかけるといい、この帰還のかけ方には正帰還と負帰還とがあります。
- (2) 正帰還とは実質的に増幅度が增加するような帰還のかけ方をいい、負帰還とは実質的に増幅度が低下するような帰還のかけ方をいいます。
- (3) 図のような回路の場合には、図 a のように出力電圧の一部を非反転入力端子にもどすと正帰還がかかり、図 b のように出力電圧の一部を反転入力端子にもどすと負帰還がかかります。



(図 a)



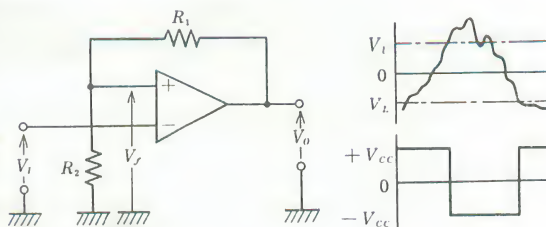
(図 b)

### 2. 正帰還動作とシュミット・トリガ回路

- (1) 図 a のようにオペアンプに正帰還をかけて回路全体の増幅度を増加していくと、図 b のようなシュミット・トリガ動作をするようになります。

- (2) 入力電圧  $V_i$  が  $V_L$  の値よりも高くなれば、出力電圧  $V_o$  はほぼ  $-V_{cc}$  となります。

- (3) 入力電圧  $V_i$  が  $V_L$  の値よりも低くなれば、出力電圧  $V_o$  はほぼ  $+V_{cc}$  となります。



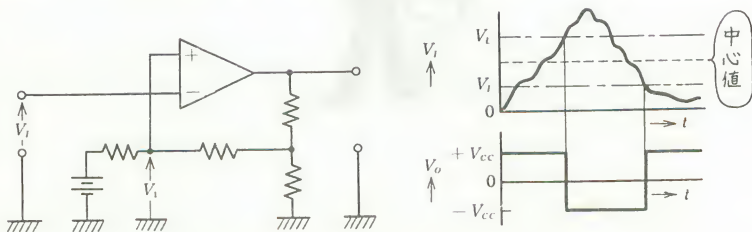
(図 a)

(図 b)

- (4)  $R_1$  や  $R_2$  の値を変えて

$V_L$  の値を変化させることによって、 $V_L$  と  $V_H$  の幅を変えることができます。

- (5) 図 c のように非反転入力端子に外部からも電圧を加え、 $V_L$  を変化させることによって、図 d のように  $V_L$  と  $V_H$  の中心値を自由に設定できるようになります。



(図 c)

(図 d)

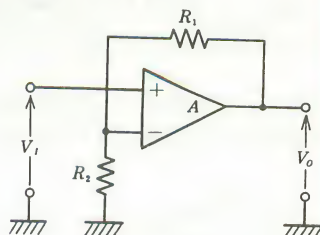
### 3. 負帰還動作と増幅回路

- (1) オペアンプに負帰還をかけると、回路全体の増幅度は低下します。

しかし、その代わりに正確な増幅度が得られるようになります。

- (2) 図の回路全体の増幅度  $A_f$  は、つぎのように外付けされた抵抗の値によって定まります。

$$A_f = \frac{V_o}{V_i} = \frac{R_1 + R_2}{R_2}$$



### 4. 負帰還動作とバッファ回路

- (1) オペアンプに負帰還をかけると、正確な増幅度が得られるだけでなく、つぎのような特徴も現れます。

○ 出力抵抗が小さくなる。

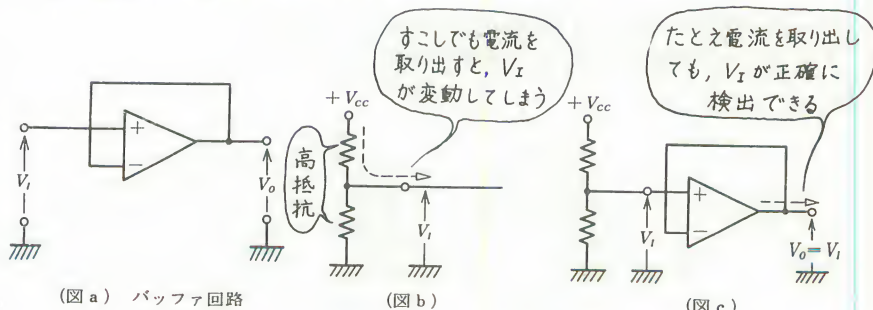
○ 増幅周波数帯域が広がる。

- (2) これらの特徴は、負帰還量を増加すればするほど顕著になり、図 a のように  $R_1$  を 0,  $R_2$  を無限大にした状態が最大になります。

しかし、このようにすると電圧増幅度は 1 になってしまいます。

このような回路をバッファ回路といっています。

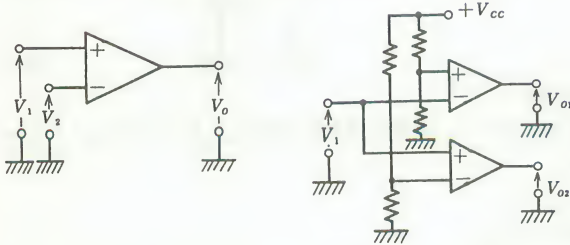
- (3) バッファ回路は図 b のように検出部の抵抗が非常に高く、すこしでも電流を取り出すと検出電圧 ( $V_i$ ) に影響を及ぼすといった場合に、正確に電圧を検出するための回路として図 c のようにして用いられています。



## 学習の展開

1 前章では、オペアンプの基本的な動作と、その代表的な活用法として比較動作について学習してきました。

そこで、この章では、オペアンプをさらにいろいろな用途に活用する方法について学習することにしましょう。



「さあ いよいよ  
オペアンプ本来の  
活用法に入って  
いきますよ」

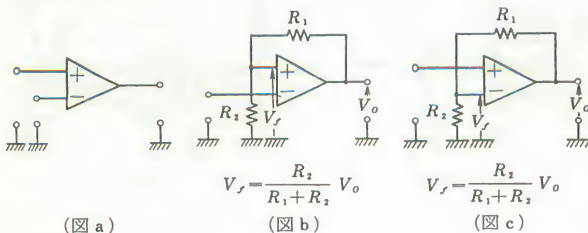
OK!

2 オペアンプは利用のしかたによって、いろいろな働きをさせることができます。

その利用のしかたを大きく分類すると、前章で学習した図 a のように、二つの入力端子のそれぞれに電圧を加えて、オペアンプ単体の特性をそのまま活用する場合と、図 b、図 c のように出力電圧の一部を入力側にもどして利用する場合とがあります。

図 b は出力電圧の一部 ( $V_f$ ) を非反転入力端子にもどしています。

また、図 c は出力電圧の一部 ( $V_f$ ) を反転入力端子にもどしています。



ホー  
すると じつよくに  
なるのかなあ  
「もうサレ 待って下さい」

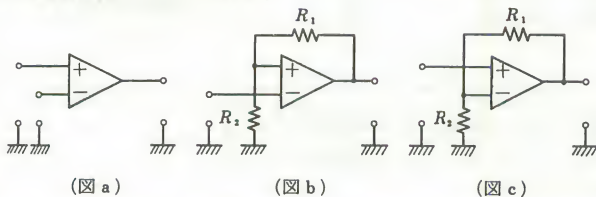
3 このように出力電圧の一部を入力側にもどすことを帰還をかけるといっていますが、帰還をかけると、回路全体はすこし変わった特性をもつようになります。

フーン

4 図 a の場合は、オペアンプ単体の特性をそのまま利用し、比較回路への活用を学習しました。

ところで、図 b、図 c のように帰還をかけると、回路全体としてはすこし変わった特性をもつようになります、これを応用していろいろな働きをさせることができるようになります。

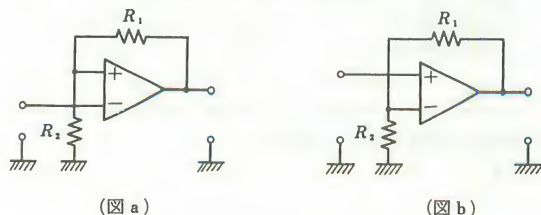
ここで  $R_1$ 、 $R_2$  の回路部分を、帰還をかけるための回路という意味で帰還回路といっています。



なにか  
思わせぶりななあ

「まあーネ」

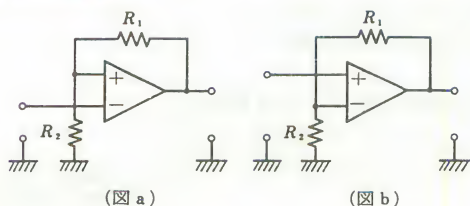
5 それでは、前章で学習した内容を基礎にして、この章では図 a や図 b のように帰還をかけたときの回路の動作がどのようなものか、また、どのような特性をもつようになるのかということについて学習し、さらに、それを応用するとどのような働きをさせることができるようになるのかを学習していきましょう。



OK 持ってきました

「その調子  
その調子」

6 まず図 a、図 b のそれぞれの回路について具体的に学習していく前に、図 a のように出力電圧の一部を(ア) 入力端子にもどした場合や、図 b のように出力電圧の一部を(イ) 入力端子にもどした場合に、どのような動作をするようになるのか、その概要をみておきましょう。



(ア) 非反転

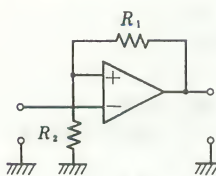
(イ) 反転

どの端子にもどすかによって、動作が違うのですか

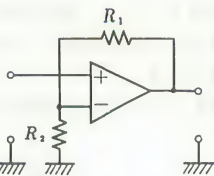
「そうなんですヨ」



7 さて、図 a や図 b のように帰還をかけると、どのような動作をするようになるのでしょうか。



(図 a)

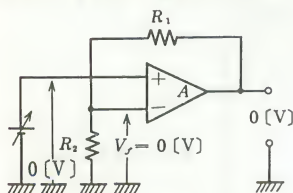


(図 b)

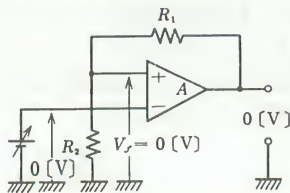
「お待たせしました  
それでは、いよいよ  
帰還回路の動作に  
入りましょう」

8 わかりやすくするため図 a、図 b の回路とも、入力電圧が 0 [V] で、出力電圧も 0 [V]、したがって  $R_1$ 、 $R_2$  によって帰還されてくる電圧 ( $V_f$ ) も 0 [V] であるとしてください。

この状態で図 a、図 b の回路の入力電圧を 0 [V] からすこし変化させたときの出力電圧がどのようになるかを考えてみます。



(図 a)

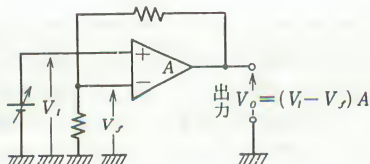


(図 b)

「あわてないで  
じっくり 考えて  
下さいよ」

9 図のように出力側から反転入力端子に帰還をかけた回路では、つぎのような動作をするようになります。

入力電圧  $V_i$  を 0 [V] から正方向に増加していくと、出力電圧  $V_o$  もつぎのように正方向に増加していきます。



$V_o = (V_i - V_f) A$  ……  $V_i$  が 0 [V] から正方向に増加すると、

初期状態では  
0 [V]

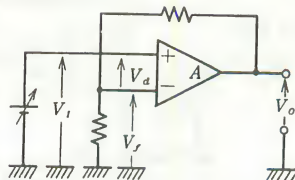
$V_o$  も 0 [V] から正方向に増加する。

そして、出力電圧  $V_o$  が 0 [V] から正方向に増加すると、帰還回路を通じて帰還されてくる電圧  $V_f$  も、0 [V] から { (ア) 正方向 } に増加していきます。

(ア)

「この帰還される電圧  $V_f$   
が 問題 ですぞ」

10 つまり、図のように出力電圧の一部を反転入力端子に帰還させた場合は、入力電圧  $V_i$  を 0 [V] から正方向に増加すると、反転入力端子の電圧も 0 [V] から正方向に増加するようになり、実質的なオペアンプの入力電圧 ( $V_d = V_i - V_f$ ) は、回路に加えた入力電圧  $V_i$  よりも小さくなってしまいます。



- ① 入力電圧  $V_i$  が 0 [V] から正方向に増加する。
- ② 出力電圧  $V_o$  が 0 [V] から正方向に増加する。
- ③ 帰還電圧  $V_f$  も 0 [V] から正方向に増加する。
- ④ 実質的なオペアンプの入力電圧  $V_d$  は  $V_i$  よりも小さくなる。

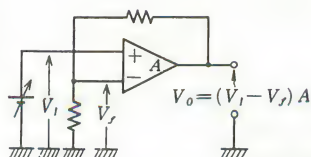
「フルボット  
 $V_i$  が打ち消されるように  
 $V_f$  かもビってくる  
わけだ。」

「そう いう こと」

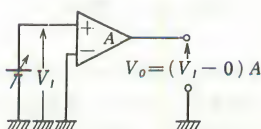
11 すなわち、図 a のように帰還をかけていると、入力電圧  $V_i$  を加えても実質的にはオペアンプには ( $V_i - V_f$ ) の電圧しか加わらなくなってしまいます。

したがって、図 b のように帰還をかけていない場合に比べると、出力電圧は { (ア) 小さく } となり、全体の増幅度  $\frac{V_o}{V_i}$  も { (ウ) 小さく } になってしまいます。

(ア) 小さく  
(ウ) 小さく



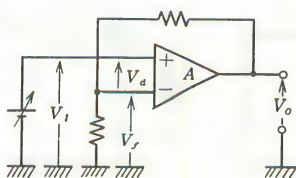
(図 a)



(図 b)

「図 a, 図 b の  
出力  $V_o$  の違いを  
よく見て下さいネ」

12 ここで、オペアンプの二つの入力端子間に加わる実質的な入力電圧  $V_d$  のことを差動入力電圧といっています。

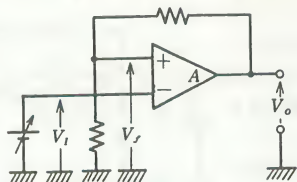


差動入力電圧？

「非反転入力端子と、  
反転入力端子との差の  
入力電圧ということ  
ですよ」

13 それでは、図のように出力側から非反転入力端子に帰還をかけた場合はどうなるでしょう。

入力電圧  $V_i$  が 0 [V] から正方向に増加すると、出力電圧  $V_o$  はつぎのようになって負方向に\_\_\_\_\_していきます。



$V_o = (V_f - V_i) A \cdots \cdots V_i$  が 0 [V] から正方向に増加すると、  
 $V_o$  は 0 [V] から負方向に増加する。

初期状態  
では 0 [V]

したがって、帰還回路を通じて帰還される電圧  $V_f$  も、0 [V] から負方向に増加していくことになります。

増加

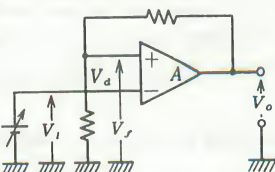
エート

$V_f$  が 負方向に増加するとい  
うことは……………

「次ツフレームへ  
いくぞ」

14 つまり、図のように非反転入力端子に帰還をかけた場合は、入力電圧  $V_i$  を 0 [V] から正方向に増加させると、帰還電圧  $V_f$  は 0 [V] から負方向に増加するようになります。

そして、オペアンプの実質的な入力電圧 (差動入力電圧  $V_d$ ) は、回路の入力電圧  $V_i$  よりも増加するようになるわけです



0 [V] から負方向に増加

$$V_d = V_f - V_i \cdots \cdots$$

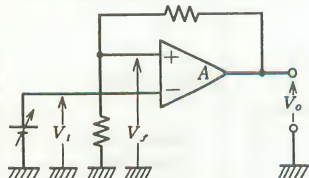
0 [V] から正方向に増加

$V_i$ 、 $V_f$  が互いに逆方向に増加するため、 $V_d$  の大きさは  $V_i$  と  $V_f$  が加算される形になり、増加する。

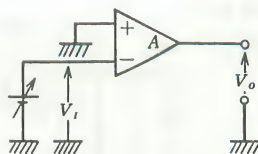
非反転入力端子と、  
反転入力端子へ  
帰還させるのでは、  
まったく逆になるのか

「そういうこと」

15 すなわち、図 a のように帰還をかけると、帰還をかけない図 b の場合に比べてオペアンプの実質的な入力電圧 (差動入力電圧  $V_d$ ) は、回路に加えた入力電圧  $V_i$  よりも大きくなり、全体の増幅度  $V_o/V_i$  も\_\_\_\_\_なるわけです。



(図 a)  $V_d = V_f - V_i \Rightarrow V_f$  が  $V_i$  に  
加算される方向に働く。



(図 b)  $V_d = (0 - V_i)$   
 $= -V_i$

大き

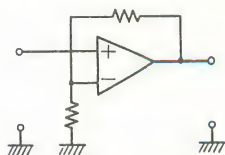
ナルホド  
 $V_i$  を加えると、  
オペアンプには、もっと  
大きな電圧が、かわるよ  
うになるわけだ。

「そういうこと」

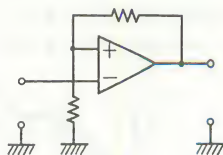
16 オペアンプに帰還をかけた場合、帰還のかけ方によってその動作がづぎのようになります。

図 a のように反転入力端子に帰還をかけた場合は実質的にオペアンプの入力電圧が減少する方向に働き、増幅度は(ア) \_\_\_\_\_ します。(ア) 減少

また、図 b のように非反転入力端子に帰還をかけた場合は、実質的にオペアンプの入力電圧が増加する方向に働き、増幅度は(イ) \_\_\_\_\_ します。(イ) 増加



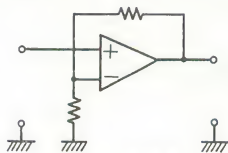
(図 a)



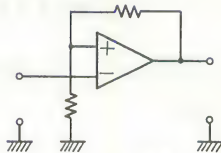
(図 b)

「いろんな使い方が  
できそうですネー」

17 ここで、図 a のように実質的な入力電圧が小さくなるような帰還のかけ方、つまり、増幅度が小さくなるような帰還のかけ方を負帰還といい、また図 b のように実質的な入力電圧が大きくなるような帰還のかけ方、つまり、増幅度が大きくなるような帰還のかけ方を正帰還といっています。



(図 a) 負帰還



(図 b) 正帰還

「正帰還、負帰還という  
言葉は、よく使います  
から、覚えて下さいヨ」

18 オペアンプに正帰還や負帰還をかけたとき、どのような動作になるかということは、理解できましたね。

正帰還をかけたときは増幅度が(ア) \_\_\_\_\_ する方向に働き、また、(ア) 増加  
負帰還をかけたときは増幅度が(イ) \_\_\_\_\_ する方向に働きました。(イ) 減少

19 ところで、いままでは正帰還や負帰還をかけたときに増幅度がどのようになるかということを中心にみてきましたが、実は、このように正帰還や負帰還をかけることによって、単に増幅度の点だけでなく、いろいろと役に立つ特性が得られるようになるのです。

それでは、このように帰還をかけることによって、全体としてどのような特性をもつようになるのか、また、それを応用するとどのような働きをさせることができるのかということについて、具体的に学習していきましょう。

「特性がわかれば、  
次は 応用ですよ」

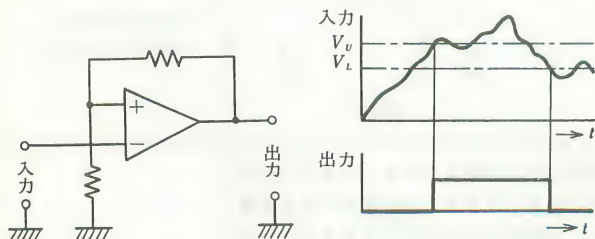
OK!



## 20 正帰還回路

オペアンプに図のように正帰還をかけると、実質的なオペアンプの入力電圧が大きくなる方向に働き、増幅度も大きくなるということは、すでに学習しました。

ところで、実はこのように正帰還をかけて増幅度を大きくしていくと、第5章で学習したような中間の値を出さないというシュミット・トリガ動作を行わせることができますようになります。



ホー  
それは おもしろい  
そんなに簡単に  
できそうですね

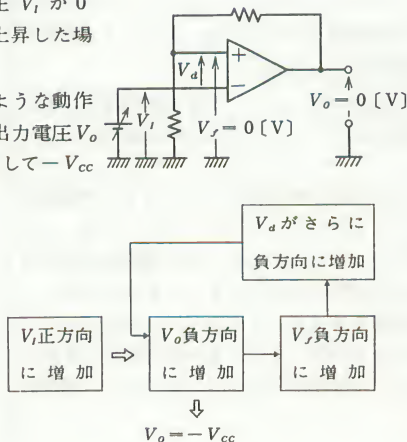
「まあーネ  
おたのしみに」

21 それでは、ここでもう一度、正帰還をかけたときの動作をみなおし、どのようにしてシュミット・トリガ動作をするようになるのかを考えてみましょう。

ここでも、最初は入力電圧  $V_i$  が 0 [V] で、出力電圧  $V_o$  も帰還電圧  $V_f$  も、ともに 0 [V] であるとしめます。

この状態で、入力電圧  $V_i$  が 0 [V] よりもわずかにだけ上昇した場合を考えてください。

正帰還回路はつぎのような動作を繰り返し、最終的に出力電圧  $V_o$  はマイナスの方向に飽和して  $-V_{cc}$  となります。



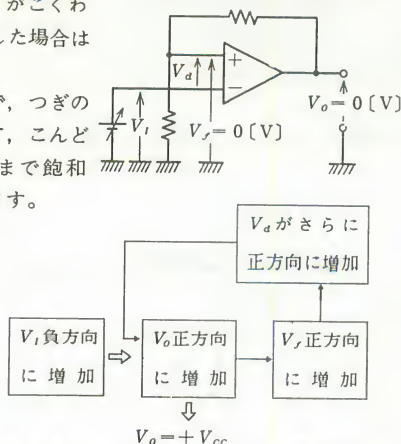
ナルホト  
連鎖反発的に 0V からの  
ズレを拡大 していく  
わけだな

「そして、一瞬のうちに、  
出力は、飽和す  
わけです」



22 また、入力電圧  $V_i$  がごくわずかに負方向に増加した場合はどうでしょうか。

さきほどと同じ要領で、つぎのような動作を繰り返して、こんどは出力電圧  $V_o$  が  $+V_{cc}$  まで飽和してしまうことになります。



すなわち、このように正帰還をかけた回路では、入力電圧  $V_i$  がごくわずかでも  $0[V]$  から変化すると、出力電圧  $V_o$  が  $+V_{cc}$  か、または  $-V_{cc}$  に \_\_\_\_\_ してしまうわけです。

すると、  
このような回路の  
出力電圧を、 $0[V]$  に  
するのは、かなり ぶつ  
かしいことですね。

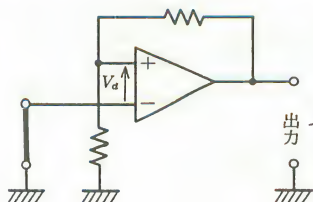
「ホー  
それか わかってくれば  
スゴイネ」

飽和

23 実際の動作では、オペアンプの実質的な入力電圧  $V_d$  が常に完全に  $0[V]$  になるということはありません。

たとえ図のように入力端子を接地しておいても、電源を入れたときのノイズであるとか、外部からのノイズであるとか、あるいは、IC内部のバランスの問題などといったいろいろな原因によって、入力電圧  $V_d$  が生じ、そして正帰還を起こして、出力電圧  $V_o$  は、  
(ア) \_\_\_\_\_ か、または(イ) \_\_\_\_\_ かのいずれかになってしまいます。

すなわち、このように正帰還をかけたときの回路動作は、出力電圧が常に  $+V_{cc}$  か  $-V_{cc}$  かのいずれかの値になり、これ以外の中間の出力を出す状態はなくなるわけです。

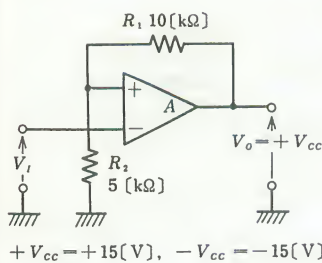


「ホールホド  
行きつくところまで  
行ってしまおうわけだ」

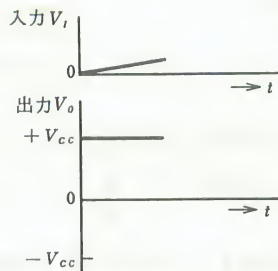
(ア)  $+V_{cc}$   
(イ)  $-V_{cc}$

24 それでは次に、このような回路が中間の出力を出すことがないという前提で、たとえば図 a のように出力電圧が  $+V_{cc}$  となっている状態において、入力電圧を  $0[V]$  から上昇させていくと、どのようになるかを考えてみましょう。

ただし、 $+V_{cc}$ 、 $-V_{cc}$  の値は、それぞれ  $+15[V]$ 、 $-15[V]$  とします。



(図 a)



(図 b)

「次のフレームへ  
どうむ」

25 図のように出力電圧  $V_o$  が  $+V_{cc}$  ( $+15[V]$ ) の状態では、 $V_f$  はつぎのように  $5[V]$  になります。

$$V_f = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_o = \frac{5}{10 + 5} \times 15 = 5[V]$$

したがって、入力電圧  $V_i$  がつぎのような値をとるときの出力電圧  $V_o$  は、それぞれつぎようになります。

$$\circ V_i = 0[V] \text{ のとき } \Rightarrow V_o = (5 - 0) A \Rightarrow +15[V]$$

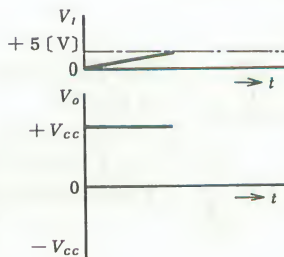
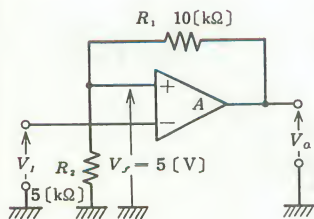
$$\circ V_i = 2[V] \text{ のとき } \Rightarrow V_o = (5 - 2) A \Rightarrow \text{(ア)} [V]$$

$$\circ V_i = 4[V] \text{ のとき } \Rightarrow V_o = (5 - 4) A \Rightarrow \text{(イ)} [V]$$

(ア) +15

(イ) +15

つまり、入力電圧  $V_i$  が  $V_i = V_f$  ( $5[V]$ ) になるまでは、出力電圧は  $+V_{cc}$  ( $+15[V]$ ) のままです。

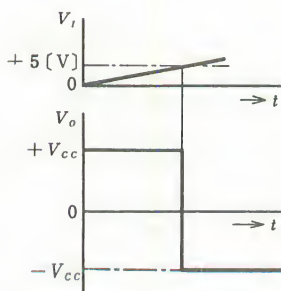
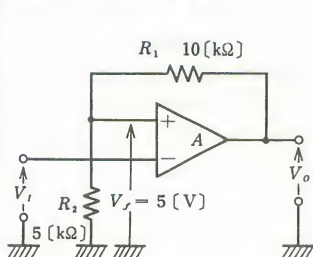


フン フン  
差動入力が 0 になるまで  
は、出力は  $+15[V]$  の  
飽和状態になって  
いわれた。

26 しかし、この回路で入力電圧が5[V]以上になるとどうでしょう。

この場合は、帰還電圧  $V_f$  よりも入力電圧のほうが高くなってオペ  
アンプの差動入力電圧  $V_d$  が負となり、出力電圧  $V_o$  は  $-V_{cc}$  ( $-15$   
[V]) になってしまいます。

つまり、図の回路で出力電圧に  $+V_{cc}$  ( $+15$ [V]) が出ている状  
態で、入力電圧  $V_i$  が  $+5$  [V] 以上になると、出力は \_\_\_\_\_ に  
変化することになります。



$-V_{cc}$  ( $-15$ [V])

ナールホド  
帰還電圧との比較動作を  
するわけですね

「そういうこと  
でも、正帰還がかかって  
いるから、中間の出力電  
圧を出さないという事は、  
忘れちゃダメですよ。」

27 では次に、出力電圧  $V_o$  に  $-V_{cc}$  が出ている状態で、出力電圧が  
 $-V_{cc}$  から  $+V_{cc}$  に変化するのは、入力電圧  $V_i$  がどのような  
ときでしょうか。

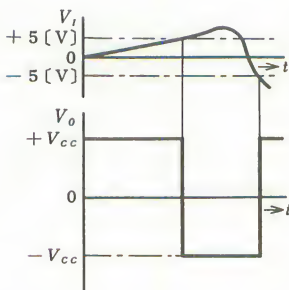
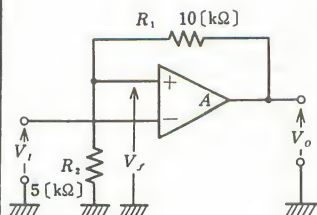
出力電圧  $V_o$  が  $-V_{cc}$  ( $-15$ [V]) になっていると、 $V_f$  はつぎの  
ように  $-5$  [V] となります。

$$V_f = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_o = \frac{R_2}{R_1 + R_2} (-V_{cc}) = \underline{\text{(ア)}} \text{ [V]}$$

(ア)  $-5$

したがって、入力電圧  $V_i$  が(ア) \_\_\_\_\_ [V] 以下になると、オペ  
アンプの差動入力電圧  $V_d$  が正となり、 $V_o$  はもとの  $+V_{cc}$  にもど  
ります。

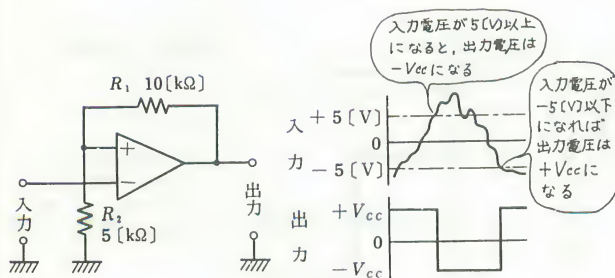
(イ)  $-5$



ナールホド  
出力が反転する時  
入力  $V_i$  は違ってくるわけか

28 つまり、図 a の回路では、中間の出力電圧が出ることはなく、図 b のように入力電圧が 5 [V] 以上になれば、出力電圧は  $-V_{cc}$  となり、入力電圧が  $-5$  [V] 以下になれば、出力電圧は  $+V_{cc}$  となるわけです。

すなわち、この回路は第 5 章で学習したシュミット・トリガ回路と同じ動作をすることになります。



(図 a)

(図 b)

—  $V_{cc}$

ウーン  
正帰還をかけると  
シュミット・トリガ回路と  
同じ動作をするわけか

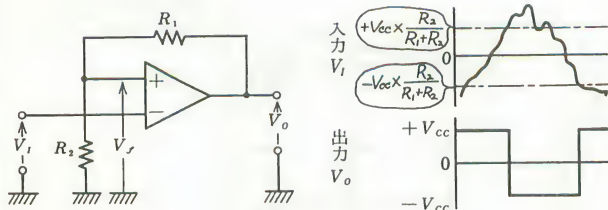
29 結局、図の回路は、オペアンプの比較判定機能を応用していることに変わりないのですが、入力電圧と比較判定する電圧値 ( $V_f$ ) が出力電圧によって変化するという動作をするわけです。

(1) 出力に  $+V_{cc}$  が出ているときは  $V_f = +V_{cc} \times \frac{R_2}{R_1 + R_2}$  となり、

入力電圧  $V_i$  がこの値以上になると出力電圧は(ア) \_\_\_\_\_ となる。(ア)  $-V_{cc}$

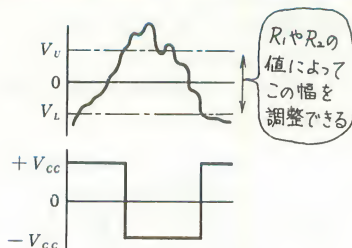
(2) 出力に  $-V_{cc}$  が出ているときは  $V_f = -V_{cc} \times \frac{R_2}{R_1 + R_2}$  となり、

入力電圧  $V_i$  がこの値以下になると出力電圧は(イ) \_\_\_\_\_ となる。(イ)  $+V_{cc}$



フシ フレ  
ナルホド

30 したがって、 $R_1$ や $R_2$ の値を変えて帰還電圧  $V_f$  を変化させることにより、 $V_u$ と $V_L$ の幅を調整することができるようになります。

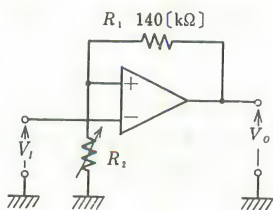


$R_1$ の値を小さくすれば幅がせまくなるわけだ

「そういうこと」

31 図の回路は、 $V_u$ と $V_L$ の幅を自由に設定できるように可変抵抗を接続した回路です。

可変抵抗  $R_2$  が  $10[\text{k}\Omega]$  のとき、 $V_u$  および  $V_L$  がどのようなか求めてみてください(ただし、 $V_{cc}=15[\text{V}]$  とします)。



$$V_u = +V_{cc} \times \frac{R_2}{R_1 + R_2} = (\text{ア}) \quad [\text{V}]$$

(ア) 1

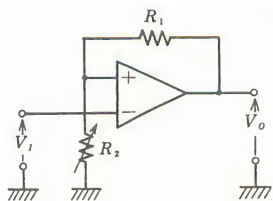
$$V_L = -V_{cc} \times \frac{R_2}{R_1 + R_2} = (\text{イ}) \quad [\text{V}]$$

(イ) -1

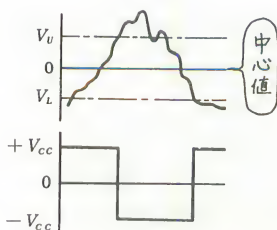
32 ところで、いままでの回路では、 $V_u$ と $V_L$ との幅を変えることはできましたが、その中心値は常に図 b のように  $0[\text{V}]$  になっていました。

しかし、実際の場合には  $V_u$  のレベルが  $5[\text{V}]$  で、 $V_L$  のレベルが  $3[\text{V}]$  というように、中心値が  $0[\text{V}]$  ではこまるときもあります。

このようなときには、どうすればよいのでしょうか。



(図 a)



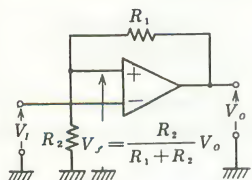
(図 b)

フン フン  
中心値が 0V とは  
限らないからアア

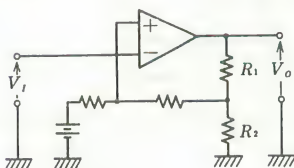


33 いままでは、非反転入力端子の電圧は、図 a のように出力からの帰還電圧  $V_f$  だけによって定まっていた。

しかし、帰還電圧だけでなく、図 b のように外部からの電圧を別に非反転入力端子に加えるとどうでしょうか。



(図 a)

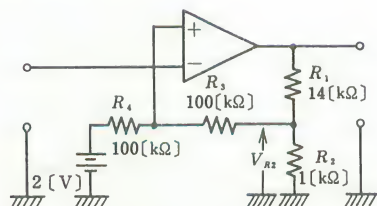


(図 b)

ウーン  
むづかしいなあ

「次のフレームへ  
どうぞ」

34 では、図の回路で  $V_H$  および  $V_L$  の値がどのようになるかを求めてみましょう (図中の  $V_{R2}$  の値は、出力電圧を  $R_1$  と  $R_2$  によって分割した値になると考えてください)。



$V_{R2}$  は  $R_1$  と  $R_2$  で  
分割した値になると  
考えていいのですか?

「 $R_2$  に対して、 $R_1$ 、 $R_2$   
が充分小さいですからね」

35 出力に  $+V_{cc}$  ( $+15$  [V]) が出ている場合は、 $V_{R2} = 1$  [V] となります。

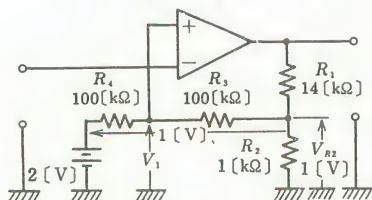
したがって、 $R_3 \sim R_4$  での電圧降下は 1 [V] となり、また  $R_3$  での電圧降下は (ア) [V] となります。

そして、 $V_1$  の値は  $R_3$  での電圧降下と  $R_2$  での電圧降下とを加えたものですから、 $V_1 = (イ)$  [V] となります。

したがって、入力電圧が 1.5 [V] 以上になると、 $-V_{cc}$  の出力が出るようになります。

(ア) 0.5

(イ) 1.5

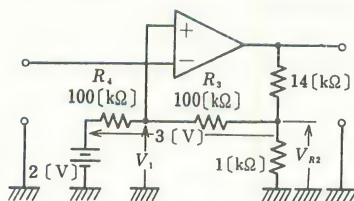


「 $V_{R2}$  は前フレーム  
までの  $V_f$  と同じこと  
ですよ」

36 また、出力に  $-V_{cc}$

( $-15[V]$ ) が出ている  
場合は、 $V_{R2} = -1[V]$   
となりますから、 $R_3 \sim R_4$   
での電圧降下は  $3[V]$  と  
なり、 $R_3$  での電圧降下が  
 $1.5[V]$  となって、 $V_1$  の  
値は  $\underline{\hspace{1cm}}[V]$  となります。

したがって、入力電圧が  $0.5[V]$  以下になると、 $+V_{cc}$  の出力が  
出るようになります。



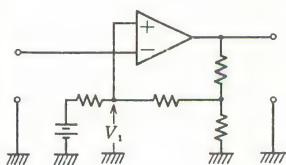
0.5

フン フン

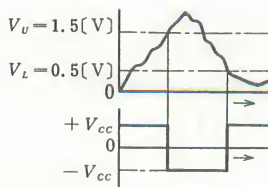
37 さて、 $V_U$  と  $V_L$  の値はどうになりましたか。

図でもわかるように、 $V_U$  と  $V_L$  の中心値が  $0[V]$  でなく、プラスの  
方向に移動してしまいましたね。

シュミット・トリガ回路で、 $V_U$  の値および  $V_L$  の値が  $0[V]$  を中  
心として対称的な動作ではこまる場合は、図 a のようにして非反転  
入力端子の電圧  $V_1$  を外部から変化させるようにすれば、自由に中心  
値が設定できるようになります。



(図 a)



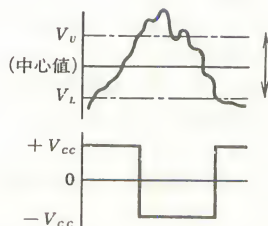
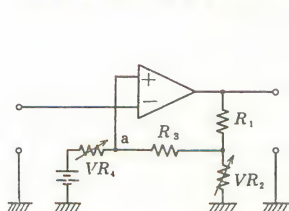
(図 b)

「ナールスト」  
非反転入力端子の電圧を  
外部から操作すれば  
いいわけですね。

「そう いう こと」

38 図の回路は、 $V_U$  や  $V_L$  の幅およびその中心値を自由に設定できる  
ようにしたものです。

- (1)  $VR_1$  を調整して点 a の電位を変化させると、 $V_U$ 、 $V_L$  の中心値  
を変えることができます。
- (2)  $VR_2$  を変えて帰還量を変化させることによって、 $V_U$  と  $V_L$  の幅  
を変えることができます。



ホー  
すると、この回路をついて  
おくと、どんなシュミット・  
トリガ動作も得られるわけだ

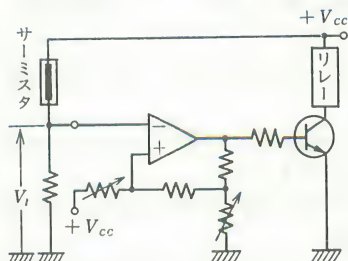
「そう、シュミット・トリガ  
の万能回路です」

39 いままでのトランジスタ回路の場合には、非常にめんどろな回路動作になりましたが、このようにオペアンプを用いると、このような動作を簡単に、しかも正確に行わせることができるようになります。

ます ます  
オペアンプが  
好きに なリネラ

40 図の回路は、サーミスタで温度を検出し、その検出電圧を、自由にレベル設定のできるシュミット・トリガ回路に加えて、リレーをON、OFFさせるようにした回路です。

温度が低下すると $V_i$ が減少し、出力電圧は $+V_{cc}$ となってリレーがONになります。

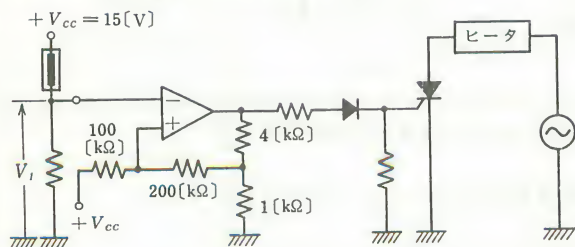


テールホド

フレ フン

41 図の回路は、サーミスタで温度を検出し、その出力でSCRを駆動してヒータをON-OFF制御するためのものです。

入力電圧 $V_i$ が9[V]以下になるとヒータが駆動され、11[V]以上になるとヒータは駆動されなくなります。



「どうです。  
オペアンプを用いると  
簡単でしょ」

42 さて、オペアンプに正帰還をかけるとシュミット・トリガ動作をさせることができ、しかもそのときのレベル設定が非常に簡単に行えることがわかったことと思います。

オペアンプを用いてシュミット・トリガ動作を行わせる方法は、よく使われますから、しっかり理解しておいてください。

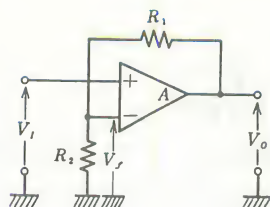
それでは次に、オペアンプに負帰還をかけた場合の動作や用途などについて学習していきましょう。

ハイ  
よく わかりました

## 43 負帰還回路

オペアンプに負帰還をかけると実質的な入力電圧が減少して増幅度が小さくなるということを、はじめに説明しました。

それでは、図の回路で入力  $V_i$  を加えたときに、出力電圧や増幅度が具体的にどのような値になるのかを考えてみましょう。

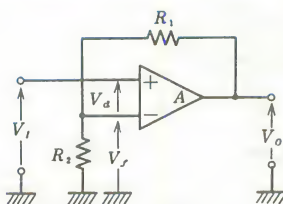


「他人まかせでなく、  
自分でもよく  
考えて下さいよ」

OK.!

44 出力電圧  $V_o$  は、オペアンプの増幅度を  $A$  とすると式(1)のように表されます。

一方、 $V_f$  は  $V_o$  によって帰還されてくるわけですから、この  $V_f$  の値を  $V_o$  で示すと式(2)のようになります。



$$V_o = (V_i - V_f) A \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$V_f = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_o \quad \dots\dots\dots (2)$$

「この式は  
もう わかりますネ」

45 ここで式(2)を式(1)に代入し、この回路全体の  $V_i$  と  $V_o$  との関係をもてみると、どのようになるでしょうか。

① 式(1)を式(2)に代入する。

$$\begin{aligned} V_o &= (V_i - V_f) A = \left( V_i - \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_o \right) A \\ &= V_i A - \underbrace{\frac{R_2}{R_1 + R_2} V_o A}_{(ア)} \end{aligned}$$

ウーン

② (ア)の項を左辺に移項し、 $V_o$  で整理する。

$$V_o + \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_o A = V_i A \Rightarrow V_o \left( 1 + \frac{R_2}{R_1 + R_2} A \right) = V_i A$$

「数少ない計算だから  
一度だけは  
カッケリ して下さいネ」

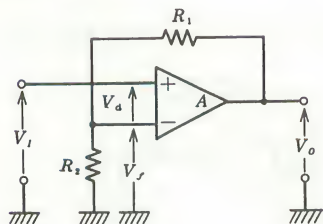
$$\therefore \frac{V_o}{V_i} = \frac{A}{\boxed{\hspace{2cm}}}$$

$$1 + \frac{R_2}{R_1 + R_2} A$$

46 負帰還回路を含めた全体の増幅度  $\frac{V_o}{V_i}$  は、つぎのようになりますね。

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{A}{1 + \frac{R_2}{R_1 + R_2} A}$$

すなわち、回路全体の増幅度  $A_f$  は、オペアンプのもつ増幅度  $A$  に対して  $\frac{1}{1 + \frac{R_2}{R_1 + R_2} A}$  に減少することになるわけです。



フン フン

$\frac{R_2}{R_1 + R_2} A$  が大きくなれば

はなるほど、増幅度が減少するわけだな

「そうですヨ」

47 このように増幅度が小さくなるにもかかわらず、なぜこうして負帰還をかけて使用するのでしょうか。

もう一度、負帰還をかけたときの回路の増幅度  $A_f$  の式をみてください。

$$A_f = \frac{A}{1 + \frac{R_2}{R_1 + R_2} A}$$

この式で  $1 \ll \frac{R_2}{R_1 + R_2} A$  という条件が成立した場合、増幅度  $A_f$  はどのようになるのでしょうか。

$$A_f = \frac{A}{1 + \frac{R_2}{R_1 + R_2} A} \Rightarrow A_f = \frac{A}{\frac{R_2}{R_1 + R_2} A} = \frac{\boxed{R_1 + R_2}}{R_2}$$

$1 \ll \frac{R_2}{R_1 + R_2} A$

$R_1 + R_2$

アレレ?

オペアンプの増幅度  $A$  がなくなった

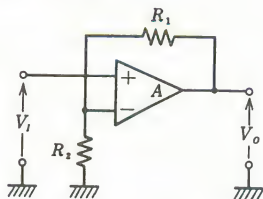
「次のフレームへ  
どうぞ」



48 全体の増幅度  $A_f$  はつぎのようになりましたね。

$$A_f = \frac{V_o}{V_i} = \frac{R_1 + R_2}{R_2}$$

つまり、 $1 \ll \frac{R_2}{R_1 + R_2} A$  という条件が成立すれば、負帰還をかけ  
たときの増幅度  $A_f$  は帰還抵抗  $R_1$ 、 $R_2$  によって決まり、オペアンプ  
のもつ増幅度  $A$  には無関係となります（一般には  $\frac{R_2}{R_1 + R_2} A$  が 100  
以上になるような帰還抵抗が選ばれています）。

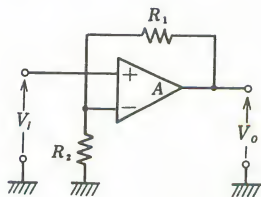


ナールホド  
オペアンプの増幅度  $A$  が  
バラツいても、大丈夫と  
いうわけか

「そう！  
 $R_1$  と  $R_2$  の値だけで、  
 $A_f$  が決まるんだよ」

49 このように、負帰還をかけると増幅度は低下しますが、その増  
幅度はオペアンプのもつ増幅度  $A$  とは無関係となり、外付けされた抵  
抗  $R_1$ 、 $R_2$  によって決まることになるわけです。

すなわち、オペアンプの増幅度がバラついていても、外付けする  
抵抗値を正確に選ぶことによって、必要な増幅度を正確に得ること  
ができるわけです。



$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{R_1 + R_2}{R_2}$$

増幅度が抵抗値  
だけで定まる

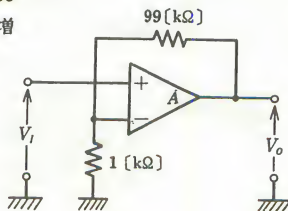
ウーん

負帰還って  
おもしろいもつだなあ

「次章にいけば、もっと  
楽しいことが起こるよ  
おたのしみだね」

50 たとえば、図のように  $R_1 = 99$   
[k $\Omega$ ]、 $R_2 = 1$  [k $\Omega$ ] とすると、増  
幅度  $A_f$  はつぎのようになります。

$$A_f = \frac{R_1 + R_2}{R_2} = \frac{99 + 1}{1} = 100$$



増幅度の計算も  
らくだねアー

51 すこしめんどろな計算をしましたけど、オペアンプにこのように負帰還をかけると、オペアンプの増幅度がどのようにバラついていても、これと無関係に外付けする抵抗によって増幅度が定まります。

したがって、正確な増幅度が得られるようになるわけです。

この特性が、オペアンプを活用するうえで非常にたいせつなことになります。

いままで、このICのことを演算増幅器といっていましたけど、このようにまるで演算をしているように正確な増幅度が得られるわけです。

オペアンプの負帰還動作は、オペアンプを活用するうえで非常にたいせつなことですから、このような回路の取り扱いについては次章でさらにくわしく学習していきたいと思います。

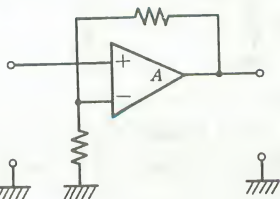
「アナタも 正確に  
学習して 下さいヨ」

ハイ、ハイ。  
帰還をかけた方がネ

52 ところで、オペアンプに負帰還をかけた場合の利点は、このように単に正確な増幅度が得られるというだけではありません。

そのほかにも、いろいろな特徴があります。

そこで次に、オペアンプに負帰還をかけたときに現れるその他の特徴について学び、それがどのようなところに应用されているかということについて学習しておきましょう。



フエー  
まだ 他にあるんですか

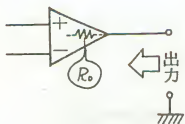
「そうですヨ」

53 オペアンプに負帰還をかけると、正確な増幅度が得られるということのほかに、つぎのような特徴が得られます。

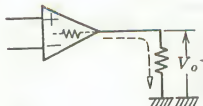
- (1) 出力抵抗がさらに小さくなる。
- (2) 増幅周波数帯域がさらに広がる。

「前章でも  
ケレ びてきたんじよ」

54 出力抵抗とは、図 a のようにオペアンプの出力側から内部を見た抵抗  $R_o$  のことをいい、出力抵抗が低いということは、この抵抗  $R_o$  が非常に小さく、図 b のようにオペアンプから電流を取り出しても出力電圧がほとんど変化しないという意味をもっています。



(図 a)



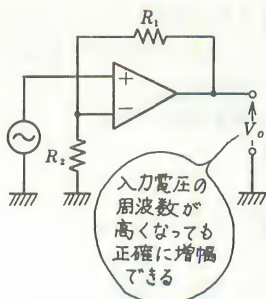
(図 b)

$R_o$  が小さいので  
電流を流しても  
 $V_o$  がほとんど  
変化しない

出力端子の内部抵抗を  
考えて いろいろですか

「まあーネ」

55 また、増幅周波数帯域が広くなるということは、図のようにオペアンプに交流信号電圧を加えたときに、たとえその周波数が高くなっても正確に増幅できるという意味をもっています。

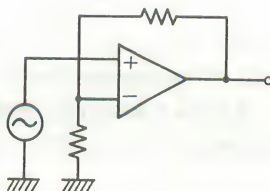


フーン

いろいろな特徴を  
発揮するんだナ

56 本来、オペアンプは単体でもこのような特性をもっているのですが、負帰還をかけることによって、さらにその特性が向上するわけです。

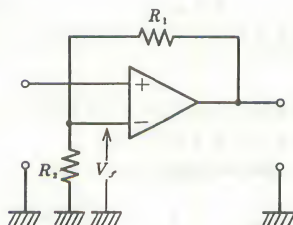
- (1) 出力抵抗がさらに低くなる。
- (2) 増幅周波数帯域がさらに広がる。



負帰還の  
イロヨフはすごいネー

57 これらの特徴は、負帰還の量を大きくすればするほど、大きく現れるようになります。

すなわち、図の回路で  $R_1$  を小さく、 $R_2$  を大きくすればするほど、負帰還量が増加して出力抵抗は                      くなり、増幅周波数帯域は広がっていきます。



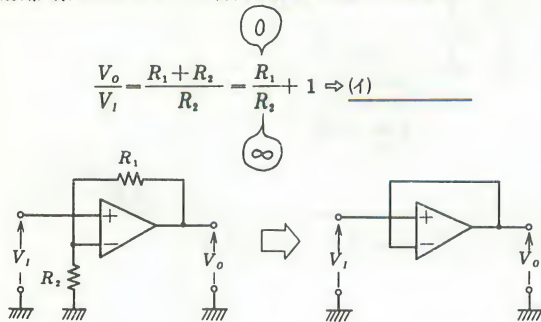
小さ

つまり、たとえオペアンプの出力から電流を取り出しても、出力電圧はほとんど変化せず、さらにどのような周波数成分でも正確に増幅することができるようになるわけです。

ナールド  
これからは 大いに  
活用なくては……

58 そして、このような特性は、図 b のように出力電圧をそのまま抵抗を通さずに入力に帰還させた状態が最大となります。

図 b のように、出力をそのまま入力に帰還させたような形にすると、増幅度はつぎのように、ほぼ 1 という非常に小さな値になってしまいますが、それに対して出力抵抗は(ア) くなり、増幅周波数帯域は広がるという特徴が顕著に現れてきます。



(図 a)

(図 b)

(ア) 小

(イ) 1

「そして、外付け部品も  
必要ありません」

ホーフ、  
これは スパラシー

59 このような回路は、図 a のように検出部の抵抗が非常に高く、すこしでも電流を取り出すと、検出部からの検出電圧に影響を及ぼすといった場合に、正確に電圧を検出するための回路としてよく用いられています。

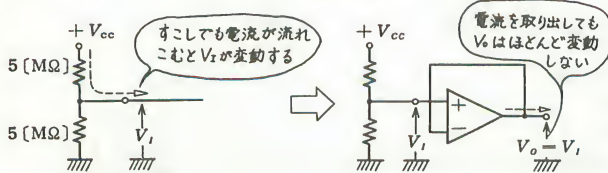
図 b のようにすると、オペアンプの入力抵抗は非常に高いですから、検出部からほとんど電流を取り出しません。

したがって、オペアンプを接続しても、 $V_i$  の値が変動することはありません。

また、負帰還が最大にかかっていますから、オペアンプの出力抵抗は非常に低く、たとえ電流を取り出しても、出力電圧  $V_o$  が変動することはありません。

すなわち、たとえ出力電流を取り出しても、入力電圧  $V_i$  の値を正確に検出することができるようになるわけです。

このような回路をバッファ (Buffer) 回路といっています。



(図 a)

(図 b)

「Buffer のことを  
緩衝増幅器と呼  
びます」

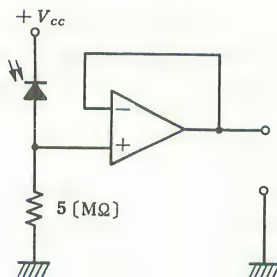


60 図の回路は、ホトダイオードの検出電圧を正確に取り出すための回路です。

第2章で説明したように、ホトダイオードはダイオードの逆方向特性を利用したものですから、内部抵抗が非常に高いのですが、このバッファ回路を用いると、うまく検出できるようになります。

しかし、このようにすると増幅度は1となって、増幅機能をもたせることはできません。

したがって、このバッファ回路を通したあと、必要に応じて増幅するようにしています。



検出器からは、電流を取り出さずに、正確な電圧検出ができるということですね

「そう いう こと」

「ご苦労さん  
でした」

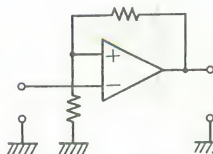


## 練習問題

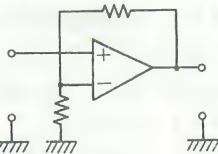
1 つぎの文章の \_\_\_\_\_ の中に適する言葉を入れ、文章を完成しなさい。

- (1) 帰還のかけ方を大別すると正帰還と負帰還がありますが、増幅度が実質的に低下するような帰還のかけ方を(ア) \_\_\_\_\_ といい、増幅度が増加するような帰還のかけ方を(イ) \_\_\_\_\_ としています。

- (2) 図 a のように出力電圧の一部を非反転入力端子にもどすと(ア) \_\_\_\_\_ 帰還がかかるようになり、また図 b のように出力電圧の一部を反転入力端子にもどすと(イ) \_\_\_\_\_ 帰還がかかりますようになります。



(図 a)



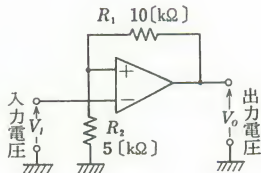
(図 b)

- (3) 負帰還をかけた回路では、外付けされた抵抗値のみによって増幅度が定まるようになりますが、それに加えてつぎのような特徴が現れてきます。

- 出力抵抗が(ア) \_\_\_\_\_ くなる。  
○増幅周波数帯域が(イ) \_\_\_\_\_ くなる。

2 図の回路はオペアンプを用いたシュミット・トリガ回路です (ただし、電源電圧は  $\pm 15[V]$ )。

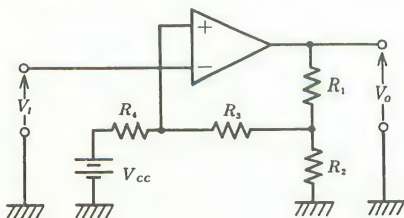
- (1) この回路で、出力電圧  $V_o$  が  $-V_{cc}$  から  $+V_{cc}$  に変化するときの入力電圧  $V_i$  は何ボルトですか。  
(2) また、出力電圧  $V_o$  が  $+V_{cc}$  から  $-V_{cc}$  に変化するときの入力電圧  $V_i$  は何ボルトですか。



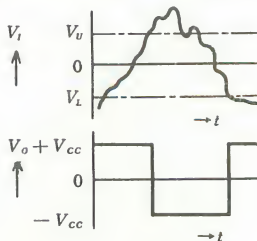
3 図 b は図 a のシュミット・トリガ回路の動作を示しています。

図 a の  $R_1$ ,  $R_2$  の値に対して  $R_3$ ,  $R_4$  の値が非常に大きいものとして、つぎの問いに答えなさい。

- (1) 図 a の回路で  $R_2$  の値を変化させると、 $V_U$  や  $V_L$  の値はどのように変化しますか。  
(2) 図 a の回路で  $R_4$  の値を変化させると、 $V_U$  や  $V_L$  の値はどのように変化しますか。



(図 a)

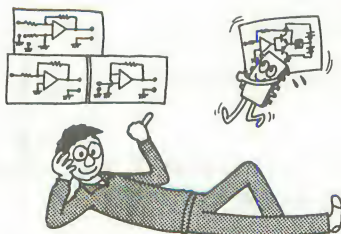


(図 b)

# 11. オペアンプの活用法(Ⅱ)

## 学習の目標

1. オペアンプに負帰還をかけたときに生じる現象を理解し、負帰還回路の取り扱い方を学習する。
  - (1) オペアンプに負帰還をかけたときに、どのような現象が生じるか。
  - (2) この現象を活用すると、負帰還回路の取り扱いがどのようにべんりになるのか。
2. オペアンプを用いた各種基本応用回路について学習する。
  - 反転増幅器
  - 非反転増幅器
  - 差動増幅器
  - その他の各種回路



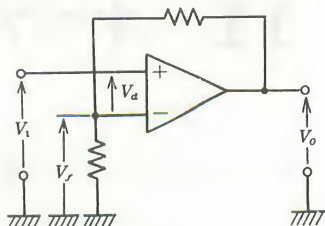
## 学習の概要

### 1. オペアンプの負帰還動作の考え方

- (1) オペアンプに負帰還をかけると、帰還電圧  $V_r$  によって、差動入力電圧  $V_d$  がほぼ  $0[V]$  とみなせるような値になります。

この現象をイマジナル・ショートといいます。

- (2) イマジナル・ショートの現象を積極的に利用すると、負帰還をかけたオペアンプ回路の動作をつぎのように考えることができます。



負帰還をかけたオペアンプ回路では、帰還されてくる電圧  $V_r$  が作用して差動入力電圧  $V_d$  が常に約  $0[V]$  になるような出力電圧を出す。

- (3) この考え方を応用すると、負帰還をかけたオペアンプ回路の出力電圧は、簡単に求めることができます。

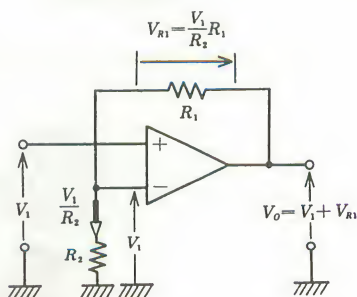
〈例〉 図の回路の出力電圧はつぎのように求めることができます。

- ① 差動入力電圧を  $0[V]$  にするために  $R_2$  にも  $V_1$  の電圧を発生する。

- ②  $R_2$  に  $V_1$  の電圧を発生するためには、

$R_2$  に  $\frac{V_1}{R_2}$  の電流が流れなければならない。

- ③ この電流はオペアンプからは流れてこないため、すべて  $R_1$  を通って流れる。



- ④  $R_1$  にこの電流が流れると、 $R_1$  では  $V_{R1} = \frac{V_1}{R_2} R_1$  の電圧降下が発生する。

- ⑤ 出力電圧  $V_o$  の値は  $V_o = V_i + V_{R1}$  であり、つぎようになる。

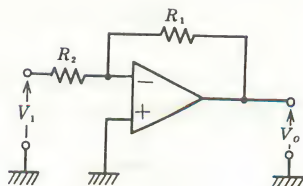
$$V_o = V_i + V_{R1} = V_i + \frac{V_1}{R_2} R_1 = V_i \left( 1 + \frac{R_1}{R_2} \right)$$

## 2. オペアンプの応用

オペアンプの負帰還動作を応用することによって、いろいろな働きをする回路を正確に、しかも簡単に得ることができます。

### (1) 反転増幅回路

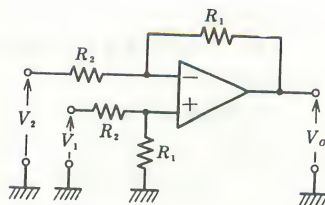
- ① 図の回路は、入力電圧  $V_1$  が上昇すると出力電圧  $V_o$  が低下するという増幅回路です。
- ② このような回路を反転増幅回路といいます。
- ③ この回路の出力電圧  $V_o$  は、つぎのようになります。



$$V_o = -\frac{R_1}{R_2} V_1$$

### (2) 差動増幅回路

- ① 図の回路は、二つの入力端子に加えた電圧  $V_1$ ,  $V_2$  の差の電圧 ( $V_1 - V_2$ ) を正確に増幅するという増幅回路です。
- ② このような回路を差動増幅回路といいます。
- ③ この回路の出力電圧  $V_o$  は、つぎのようになります。

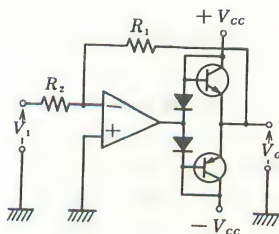


$$V_o = \frac{R_1}{R_2} (V_1 - V_2)$$

### (3) 電力制御回路を付加した反転増幅回路

- ① 図の回路は、オペアンプ出力を電力制御回路に加え、大きな負荷をも駆動できるようにした反転増幅回路です。
- ② この回路の出力電圧  $V_o$  は、つぎのようになります。

$$V_o = -\frac{R_1}{R_2}$$



- (4) このほかにも、オペアンプを用いていろいろな働きをする回路をつくることができます。

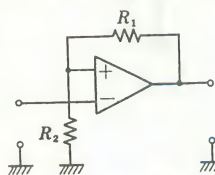
章末を参照してください。

## 学習の展開

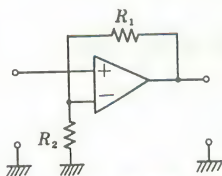
1 前章ではオペアンプに負帰還や正帰還をかけたとき、どのような動作をするかということと、それらの応用について学習しました。

図 a のように正帰還をかけるとシュミット・トリガ動作をするようになります。

また、図 b のように負帰還をかけると、この回路の増幅度は外付けた抵抗の値で定まりました。



(図 a) 正帰還



(図 b) 負帰還

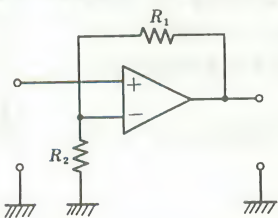
「正、負帰還の動作、特徴は覚えていますネ」

OK、バッチリです

2 ところで、この負帰還をかけた場合の増幅度を、前章では計算によって求めていました。

しかし、負帰還をかけたときに起こるある現象について知っておくと、このような回路の取り扱いが非常に楽になります。

そこで、いよいよオペアンプの最後の学習として、負帰還をかけたときの取り扱い方を学び、いろいろな機能回路への応用力をつけていきたいと思います。



大ヤ オヤ、  
もっと 楽な方法があるのかな

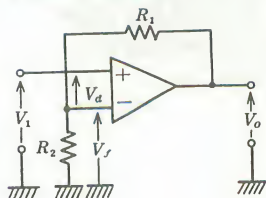
ヨーシ  
ガンバルぞー

3 では、まず負帰還をかけたとき、どのような現象が現れるのかをみてみましょう。

図のような負帰還をかけたときの動作を思い出してください。

入力電圧  $V_1$  が上昇すると、出力  $V_o$  が上昇し、反転入力端子の電圧  $V_f$  も上昇してきましたね。

すなわち、負帰還はオペアンプ



(イ) 小さく

「この現象が  
重要な意味と  
もつんですヨ」

の二つの入力端子間の電位差 ( $V_a = V_1 - V_f$ ) が { (ア) 大きく (イ) 小さく } なるような方向に出力  $V_o$  が帰還されてきました。

フーン



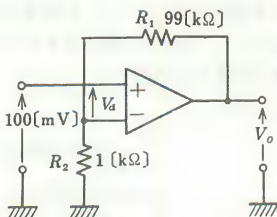
4 そこで実際に、このような回路の差動入力電圧  $V_d$  がどのような値になるかについて、図の回路に入力電圧  $V_1 = 100[\text{mV}]$  を加えてしらべてみましょう。

図の回路の増幅度  $A_r$  は、前章で学習したように、つぎのようになります。

$$A_r = \frac{V_o}{V_1} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} = \underline{(ア)}$$

したがって、出力電圧  $V_o$  はつぎのように求められます。

$$V_o = V_1 \times A_r = 100[\text{mV}] \times 100 = \underline{(イ)} \quad [\text{V}]$$



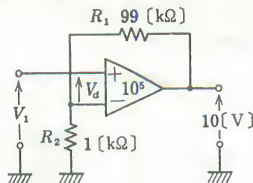
(ア) 100

(イ) 10

5 では、この状態でオペアンプの差動入力電圧  $V_d$  の値はどのようになるでしょうか。

オペアンプの増幅度  $A$  が  $10^5$  とすると、オペアンプの入出力間にはつぎの関係がありますから、出力に  $10[\text{V}]$  が出ているときの  $V_d$  の値はつぎのようになります。

$$V_o = V_d \cdot A \Rightarrow V_d = \frac{V_o}{A} = \underline{\hspace{2cm}} [\text{mV}]$$



0.1

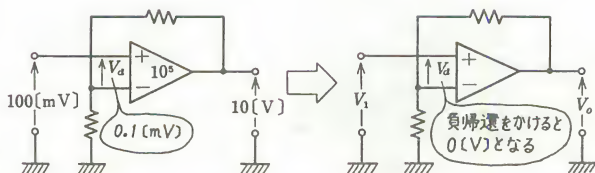
フン フン

6 さて、入力電圧  $V_1$  に対して、オペアンプの差動入力電圧  $V_d$  はどのような値になりましたか。

入力端子に加えた電圧  $100[\text{mV}]$  に対して、実際にオペアンプの入力端子に加わる電圧は  $0.1[\text{mV}]$  と非常に小さな値になってしまいましたね。

すなわち、オペアンプに負帰還をかけたときは、 $V_d$  が入力電圧  $V_1$  に対して非常に小さく、ほぼ0とみなせるような値になってしまうわけです。

実際の場合にも、負帰還をかけると、 $V_d$  の値は0とみなしてもまったく問題がないような値になります。

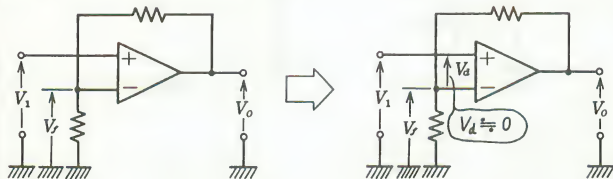


$V_d$  の値が 入力電圧  $V_1$  に対して、0 だと  
考えられると  
いうことですね

「そう！ これが  
ボイレトです」

7 つまり、オペアンプに負帰還をかけると、入力電圧  $V_i$  が増幅され、その出力電圧  $V_o$  が入力端子側に  $V_f$  として帰還されてきますが、このとき  $V_f$  の値はほぼ  $V_i$  に等しい値になるわけです。

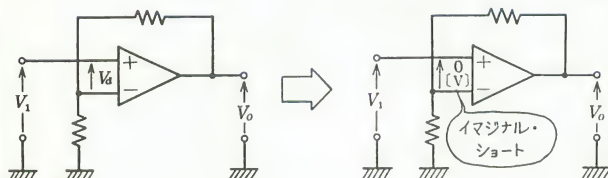
そのため、 $V_i$  と  $V_f$  との差の電圧  $V_d$  がほぼ \_\_\_\_\_ [V] になるような現象が起こるわけです。



0

ナルホド  
差動入力はい  
0V になるわけか

8 このように、オペアンプに負帰還をかけたとき、出力電圧が帰還されてきて、実質的に差動入力電圧  $V_d$  が 0 [V] になるという現象をイマジナル・ショートと呼んでいます。



イマジナル・ショート  
日本語ではどうなの?

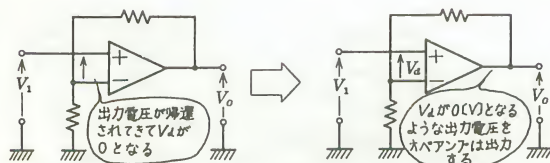
「仮想短絡」とでも  
訳すかな」

9 ところで、この現象をうまく利用すると、オペアンプの動作を考えるうえで非常にべんりになります。

いままでは図 a のように、入力電圧を加えると増幅された出力電圧が現れ、この出力電圧が帰還されてきて、結果的にオペアンプの差動入力電圧  $V_d$  が約 0 [V] になると考えてきました。

しかし、このようには考えず、図 b のように負帰還をかけたオペアンプ回路は、差動入力電圧  $V_d$  が約 0 [V] になるような出力電圧  $V_o$  を出すのだと考えるとどうでしょう。

実際には、このように考えてもまったく問題はありません。



(図 a)

(図 b)

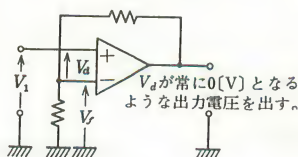
「このイマジナル・ショート  
を利用して、回路動作  
を考えるわけです」

フーン

10 すなわち、負帰還をかけたときのオペアンプ回路の動作をつぎのように考えるわけです。

負帰還をかけたオペアンプ回路では、帰還されてくる電圧  $V_f$  が作用して差動入力電圧  $V_d$  が常に約 0 [V] になるような出力電圧を出す。

- (1)  $V_1$  増加  $\Rightarrow V_d$  が 0 [V] になるように  $V_o$  が増加する。
- (2)  $V_1$  減少  $\Rightarrow V_d$  が 0 [V] になるように  $V_o$  が減少する。



ナールホド  
おもしろい見方が  
できそうですね

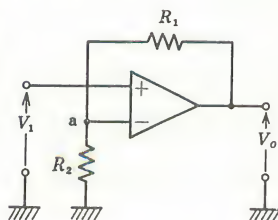
「ここが これからの  
学習のポイント  
ですよ」

11 このような考え方をすると、オペアンプの負帰還回路の動作を考える場合、めんどろな計算をせずに簡単に理解できるようになります。

それでは、このような考え方で、図のような負帰還回路の増幅度がどのようになるかを改めてみなおしてみましょう。

こんどは入力電圧  $V_1$  が与えられて、それが増幅されて出力が現れるというように考えるのではなく、点 a の電位が入力電圧  $V_1$  と等しくなるような出力電圧  $V_o$  が出るのだと考えるわけです。

すなわち、点 a の電位が  $V_1$  と等しくなるためには、出力  $V_o$  の値がいくらであればよいかということを考えればよいのです。



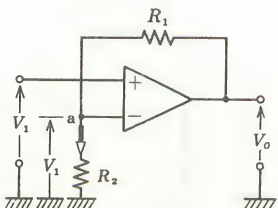
「ボイレトは  
 $V_d = 0$  という  
イマジナル・ショート  
ですよ」

フン フン  
 $V_d = 0$  なら、  
 $V_1$  と点 a の電圧が  
等しいわけだからなあ

12 さて、点 a の電位を  $V_1$  と等しくするためには、出力電圧  $V_o$  の値がいくらであればよいでしょうか。

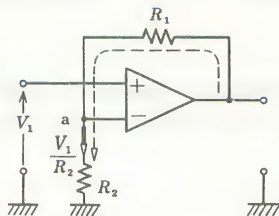
あとの学習の関係もありますから、すこしていねいに求めてみましょう。

点 a に  $V_1$  と等しい電圧を生じさせるには、ここの電圧は  $R_2$  による電圧降下で生じるのですから、 $R_2$  に \_\_\_\_\_ の電流が流れていなければなりません。



$$\frac{V_1}{R_2}$$

13 そして、オペアンプの入力抵抗が非常に高いため、入力端子にはほとんど電流が流れませんから、この  $\frac{V_1}{R_2}$  の電流は、図のようにすべて出力側から  $R_1$  を通って流れていることになります。



「オペアンプの入力端子には、電流が流れないということ、覚えてますね」

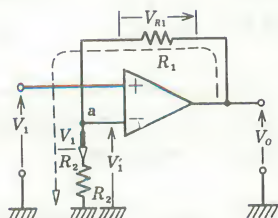
ハイ ハイ

14 そして、この電流  $\frac{V_1}{R_2}$  は、抵抗  $R_1$  でもつぎのような電圧降下  $V_{R1}$  を生じます。

$$V_{R1} = \frac{V_1}{R_2} \times \boxed{\phantom{000}}$$

したがって、点 a の電位を  $V_1$  にするための出力電圧  $V_o$  は、つぎのような式で示されます。

$$V_o = V_1 + V_{R1} = V_1 + \frac{V_1}{R_2} R_1$$



$R_1$

「わかるかな？」

キルヒホッフの第二法則  
でしよ

「スゴイネ」

15 すなわち、差動入力電圧  $V_d$  を 0 にするためには、出力電圧  $V_o$  として  $V_o = V_1 + V_{R1} = V_1 + \frac{V_1}{R_2} R_1$  の電圧が必要となるわけです。つまり、それだけの電圧がオペアンプの出力に現れることになるのです。

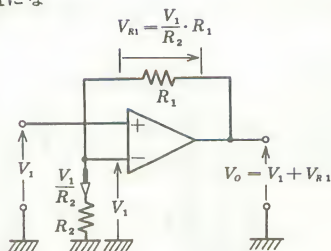
では、この式から全体の増幅度  $\frac{V_o}{V_1}$  を求めると、どのようになるでしょうか。

つぎのように、以前に求めたのと同様に  $1 + \frac{R_1}{R_2}$  という値になることがわかります。

$$V_o = V_1 + \frac{V_1}{R_2} R_1$$

$$= V_1 \left( 1 + \frac{R_1}{R_2} \right)$$

$$A_f = \frac{V_o}{V_1} = \underline{\hspace{2cm}}$$



「10章 487ページと比較して下さい」

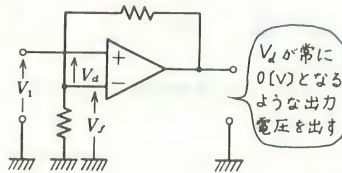
$$1 + \frac{R_1}{R_2}$$



16 このように、負帰還回路の動作を考える場合、与えられた入力電圧が増幅されて出力に現れると考えるのではなく、差動入力電圧  $V_d$  が  $0[V]$  になるような出力電圧がでると考えておくと、非常に理解がしやすくなります。

そして、このように考えておくと、計算をする場合も非常に簡単に求めることができるようになります。

負帰還をかけた回路であれば、このような考え方を using 動作を知ることができます。



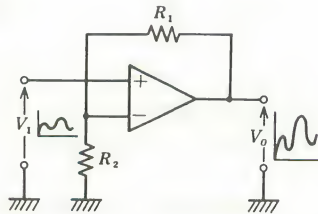
ナールホド

おもしろい 考え方が  
できるものですね

「わかりやすいでしょ」

17 オペアンプに負帰還をかけたときの動作の考え方は理解できましたね。

ところで、いままでに考えてきた負帰還増幅回路は、入力電圧  $V_i$  を非反転入力端子に加えていますから、図のように  $V_i$  が  $0[V]$  から上昇すると、出力電圧  $V_o$  も  $0[V]$  から上昇するという回路でした。



「トランジスタ1段の  
電圧増幅器は  
どうだったかな」

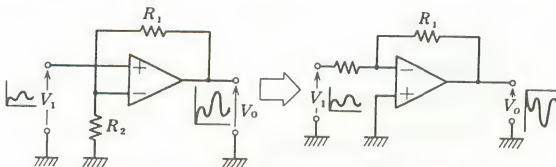
入、出力特性が  
逆 だったなあ

このような増幅回路を、入力に対して出力が反転しないという意味から非反転増幅回路といっています。

18 では、図 a のような非反転増幅回路を変形して、図 b のようにするとどうでしょうか。

図 b のように反転入力端子に入力電圧を加えると、入力に対して反転した出力を出す増幅器が得られます。

このような回路を、非反転増幅回路に対して反転増幅回路といっています。



(図 a) 非反転増幅回路

(図 b) 反転増幅回路

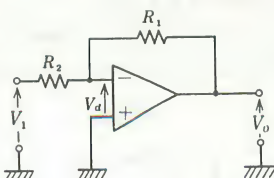
トランジスタ1段の場合  
と同じになるということ  
ですね。

「そう いう こと です」



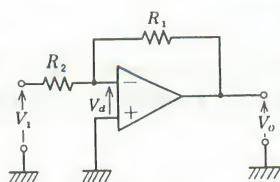
19 たとえこのようにしても、出力側から反転入力端子に帰還をかけているわけですから、負帰還をかけている点には変わりありません。

また、負帰還回路ですから、差動入力電圧  $V_d$  が  $0[V]$  になるような出力電圧が出るというオペアンプの負帰還動作にも変わりありません。



「 $V_d$  の電圧を正方向に増加したとき、 $V_d$  がどのようななか確認して下さい」  
「 $V_1$  に対して  $V_d$  が小さくなる方向に働きますよ」

20 では、オペアンプの負帰還動作に対する理解をさらに深めるために、この反転増幅回路の動作をみていきましょう。



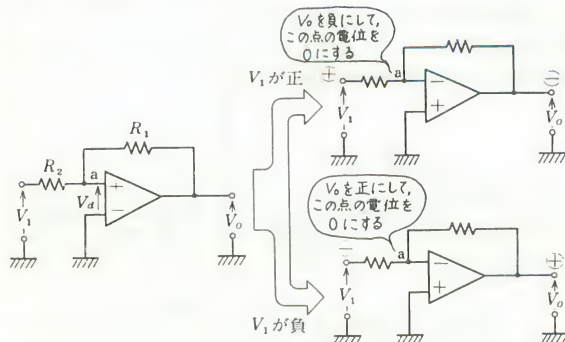
「ポイントは  $V_d = 0$  ですよ」

OK!

21 この回路の場合は、非反転入力端子が接地されて  $0[V]$  になっていますから、点 a の電位も  $0[V]$  になるように出力電圧がコントロールされます。

もっと具体的にいうと、入力に正の電圧が加わった場合は、出力電圧を負にして、ちょうど点 a の電位が  $0[V]$  になるように動作するわけです。

また、反対に入力に負の電圧が加わった場合は、出力電圧  $V_0$  を { (ア) 正 } にして、同じく点 a の電位が (ウ)  $0[V]$  になるように動作するわけです。



$V_d$  を  $0[V]$  にするためには、こうなうざるを得んあ

「そうでしょう  
そのように働くのです」

(ア) 正 (ウ) 0

22 このような場合の出力電圧  $V_o$  も、いままでと同じ要領で求めることができます。

いま、入力電圧  $V_i$  が正の場合を考えてみましょう。

この場合、点 a の電位を 0 にするので、 $R_2$  の抵抗には  $\frac{V_i}{R_2}$  の電流が流れます。

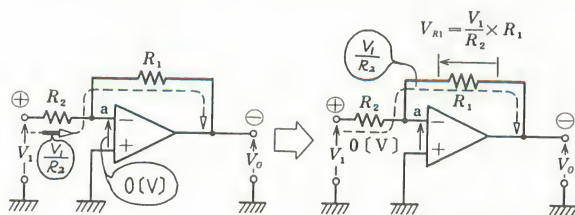
この電流は、すでに述べたようにオペアンプには流れこみません。オペアンプは、図 a のように出力側の電位をマイナス方向に下げ、この電流を抵抗  $R_1$  の側に流しこませるように働くわけです。

そして、この電流  $\frac{V_i}{R_2}$  によって抵抗  $R_1$  には図 b のように  $V_{R1}$  の電圧降下を生じるようになります。

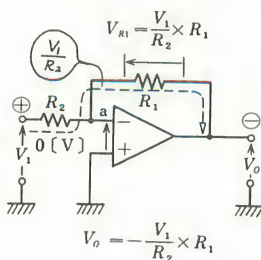
さて、出力電圧はどのようになっているでしょうか。

出力電圧は、点 a の電位が 0 [V] ですから、 $R_1$  での電圧降下だけとなり、つぎのようにマイナスの極性をもったものとなります。

$$V_o = -V_{R1} = \underline{\hspace{2cm}}$$



(図 a)



(図 b)

$$-\frac{V_i}{R_2} \times R_1$$

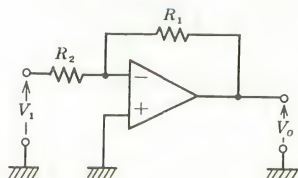
ナールホド  
すごく 簡単だナア

「どんな 出力か  
現れるか」  
すぐ わかりますネ」

23 したがって、増幅度  $\frac{V_o}{V_i}$  はつぎようになります。

$$V_o = -\frac{V_i}{R_2} \times R_1$$

$$\therefore \frac{V_o}{V_i} = \underline{\hspace{2cm}}$$



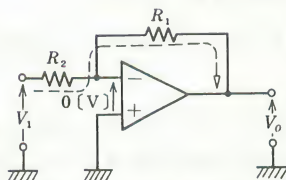
$$-\frac{R_1}{R_2}$$

24 オペアンプに負帰還をかけたときの考え方がわかりましたか。

これらの回路動作を考えていくときのポイントは、すでに述べたようにつぎの二つの点です。

(1) 負帰還回路では、差動入力電圧  $V_d$  が(ア) \_\_\_\_\_ [V] になる。

(2) オペアンプは入力抵抗が非常に高く、オペアンプの入力端子には電流が(イ) \_\_\_\_\_。



(ア) 0

(イ) 流れない

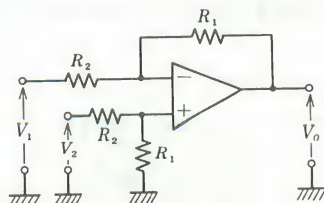
これら二点のことさえ理解しておけば、ほとんどのオペアンプ回路がわかるようになりますから、しっかり覚えておいてください。

ハ—イ  
わかりました

25 それでは、いままでの学習のまとめをかねて、図のような回路の動作を考えてみましょう。

いろいろな働きをする回路例ができますが、章末にまとめて示しておきます。

ここでは負帰還回路の取り扱い方をしっかり身につけてください。



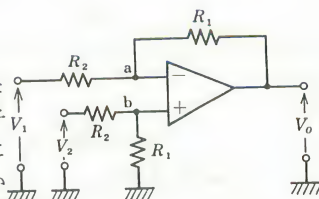
「 $R_1$  や  $R_2$  の記号を二箇所  
で利用しているのは、  
同一値の抵抗を指して  
いるからですヨ」

26 図の回路は、二つの入力端子に加えた電圧  $V_1$ 、 $V_2$  の差を  $\frac{R_1}{R_2}$

倍に増幅する差動増幅器としての働きをするものです。

このように回路がやや複雑になっても、出力電圧を反転入力端子にもどして負帰還をかけていることに変わりはありませんから、いままでと同じ考え方でよいわけです。

この回路の場合は点 b の電位が  $V_2$  によって定まりますから、点 a の電位が点 b の電位に等しくなるような出力電圧を出すようになります。

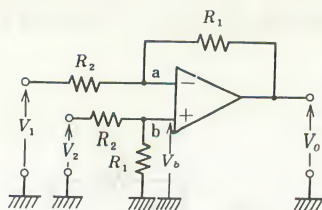


点 b の電位が  $V_2$  によって  
定まる?

27 それでは具体的に動作をみていきましょう。

まず、点bの電位  $V_b$  はつぎようになります。

$$V_b = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \times \boxed{\phantom{000}}$$

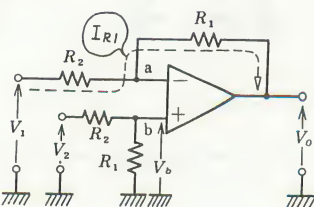


「メモ用紙を出して、  
自分でも計算して  
下さいネ」

$V_2$

28 次に、点aの電位は点bの電位と等しいわけですから、帰還回路の抵抗  $R_1$  に流れる電流  $I_{R1}$  はつぎようになります。

$$\begin{aligned} I_{R1} &= \frac{V_1 - \boxed{\phantom{000}}}{R_2} \\ &= \frac{V_1}{R_2} - \frac{V_b}{R_2} \\ &= \frac{V_1}{R_2} - \frac{1}{R_2} \cdot \frac{R_1 V_2}{R_1 + R_2} \end{aligned}$$

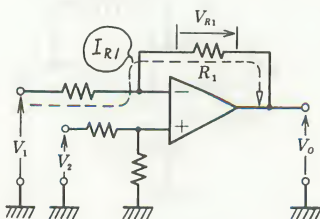


$V_0$

フン フン

29 したがって、この抵抗  $R_1$  における電圧降下  $V_{R1}$  はつぎようになります。

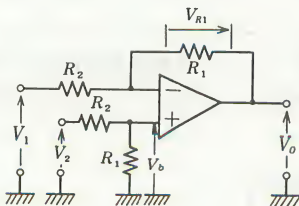
$$\begin{aligned} V_{R1} &= -I_{R1} \cdot R_1 \\ &= -\frac{V_1 R_1}{R_2} + \frac{V_2 R_1^2}{R_2(R_1 + R_2)} \end{aligned}$$



「回路を見ながら  
計算を進めて下さいヨ」

30 出力電圧  $V_0$  は、この  $V_{R1}$  と  $V_b$  との和となりますから、順次式を整理していくとつぎようになります。

$$\begin{aligned} V_0 &= V_b + V_{R1} \\ &= \frac{V_2 R_1}{R_1 + R_2} - \frac{V_1 R_1}{R_2} + \frac{V_2 R_1^2}{R_2(R_1 + R_2)} \\ &= \frac{V_2 R_1 R_2 - V_1 R_1(R_1 + R_2) + V_2 R_1^2}{R_2(R_1 + R_2)} \\ &= \frac{V_2 R_1(R_1 + R_2) - V_1 R_1(R_1 + R_2)}{R_2(R_1 + R_2)} \\ &= \frac{V_2 R_1}{R_2} - \frac{V_1 R_1}{R_2} = \frac{R_1}{R_2} (\boxed{\phantom{000}}) \end{aligned}$$



ウン  
大変だねア

「式の交換だけでしょ」

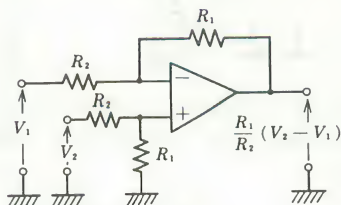
$V_2 - V_1$



31 すなわち、この回路は最初に述べたとおり、二つの入力端子に  
加えた電圧の差を  $\frac{R_1}{R_2}$

倍に増幅する差動増幅器  
としての働きをしています。

オペアンプは単体でも  
差動増幅器としての働き  
をしているわけですが、  
このような回路に組むと、  
非常に正確な増幅度を得  
ることができるようにな  
ります。



増幅度は  $R_1$  と  $R_2$  の値で  
決まることになるのか

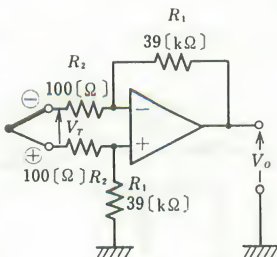
「そうですよ、

すこく あっさりした  
値に「なったでしょ」

「 $R_1$ 、 $R_2$  の抵抗を同じ  
値にしたとこうか  
ホイレットです」

32 図の回路は、熱電対  
で温度を検出し、その検  
出電圧を差動増幅回路で  
増幅しようとする回路です。

この回路では  $R_1$ 、 $R_2$  に  
それぞれ  $39[k\Omega]$ 、 $100[\Omega]$   
がついていますから、熱  
電対の検出電圧  $V_T$  が  
\_\_\_\_\_ 倍に増幅さ  
れて出てきます。



390

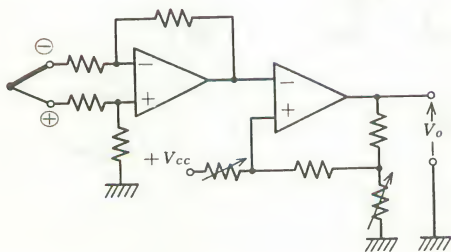
アレッ

こんな使い方も  
できるんですか

「もちろん

前フレームの  $V_1 - V_2$  が  
 $V_T$  となるわけですヨ」

33 また、図の回路は、前フレームの差動増幅回路の出力電圧を  
\_\_\_\_\_ 回路でレベル判定し、 $+V_{cc}$  か  $-V_{cc}$  かの出力を出させ  
るようにした回路です。



シュミット・トリガ

フン フン

この出力で SCR や  
トライアックを駆動  
すれば、いいわけだ。

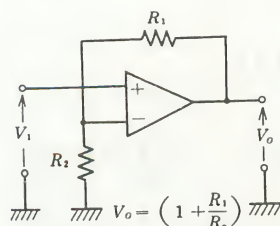


34 オペアンプの負帰還回路の動作についての考え方は、もうじゅうぶんわかりましたね。

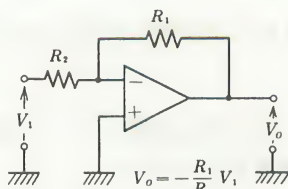
このような負帰還動作は、オペアンプの各種の応用を考えるうえで非常に重要です。

いままでの学習で、図のような非反転増幅器、反転増幅器、差動増幅器のそれぞれの動作をみてきましたが、これ以外にも負帰還動作をさせていろいろな機能をもたせた回路があります。

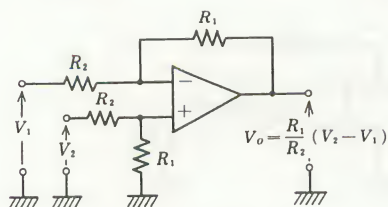
章末に、これらの各種機能回路の例を項目別にしておきますので、参照してください。



(図 a) 非反転増幅器



(図 b) 反転増幅器



(図 c) 差動増幅器

ウー

という 出てきたなあー

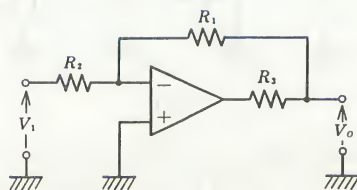
「 $V_d = 0$  の考え方を  
つかえば、

出力  $V_0$  の式は  
導き出せるはずだよ」

35 さて、最後にくだいようですが、オペアンプの負帰還動作についてより完全に理解するために、もう一度だけ図のような回路の動作を考えてみたいと思います。

この回路では、オペアンプ出力のところに抵抗  $R_3$  がはいつています。

この回路の示す動作も、オペアンプの応用を考えるうえで非常にたいせつです。



この回路は  
なにをするための回路  
かな

「負帰還動作を  
より完全に把握しよう  
とするための  
もつです」

36 この場合にも、負帰還動作の基本的な考え方は同じです。

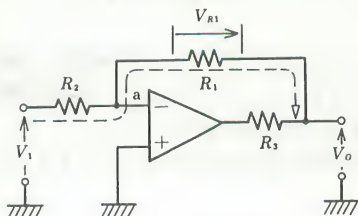
すなわち、点 a の電位が \_\_\_\_\_ [V] となるような動作をします。

したがって  $R_1$  には  $-\frac{V_1}{R_2}$  の電流が流れ、 $R_1$  にはつぎのような電圧降下  $V_{R1}$  が生じます。

$$V_{R1} = -\frac{V_1}{R_2} \times R_1$$

そして、この値がそのまま出力電圧  $V_o$  になりますから、出力電圧は抵抗  $R_3$  がなくなるときと同じになります。

つまり、オペアンプの出力側に抵抗を接続しても、その抵抗はオペアンプの動作にまったく影響を与えません。



0

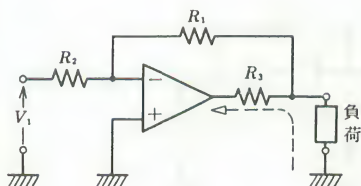
ナルホド

出力電圧は  $R_1, R_2$  で決まってしまうわけだ

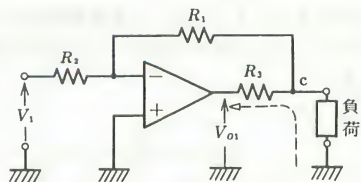
37 このことは、図のよう  
に出力側に負荷抵抗を  
つけて、負荷電流を流し  
た場合も同じです。

図 a のように負荷電流を流すと、それによる  $R_3$  の電圧降下で出力が変化しそうに感じますが、そのようなことはありません。

なぜなら、もし負荷電流によって出力が  $-\frac{R_1}{R_2} V_1$  にならなければ、イマジナル・ショートが成立しなくなるからです。



(図 a)



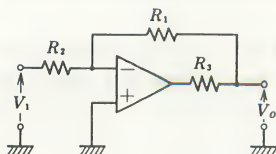
(図 b)

実際には、図 b のように電流が変化して  $V_o$  が変化しかけると、オペアンプの出力  $V_{o1}$  が変化して  $R_3$  の電圧降下分をうまく吸収し、点 c には以前と同じ出力が出るように働くのです。

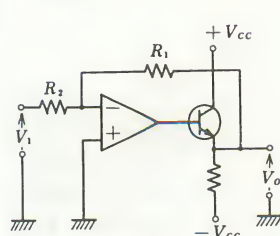
ウーン  
これは面白い  
特性だねー

「オペアンプ  
ならではの  
むつですヨ」

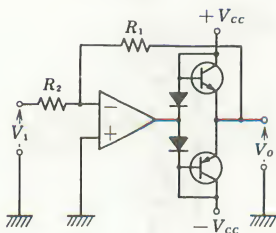
38 それでは、図 a の考え方を適用して、図 b や図 c のようにオペアンプの出力にトランジスタを用いた電力制御段を接続した回路について考えてみてください。



(図 a)



(図 b)



(図 c)

「出力  $V_o$  は  
どうなるかな」

39 どのようになりましたか。

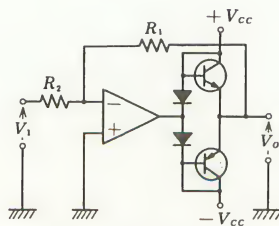
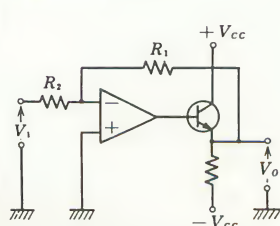
たとえこのように電力制御段を接続しても、 $R_1$  を通じて負帰還がかかっていることには違いありません。

したがって、いままでと同じ考え方で取り扱うことができます。

出力端子の電圧  $V_o$  は、前フレームの図 a の回路動作で求めたように、正確に   $\times V_1$  になります。

$$-\frac{R_2}{R_1}$$

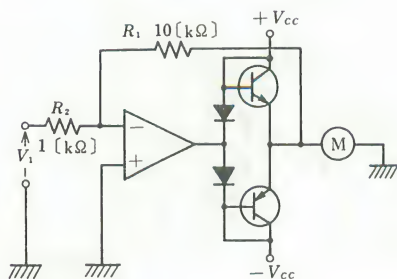
オペアンプは集積回路ですから、大きな電力は扱えないため、オペアンプ出力で直接大きな負荷を働かせることはできませんが、このようにトランジスタを用いた電力制御回路を介することによって、正確な出力電圧が出せ、しかも大電力負荷を駆動することが可能になるのです。



「オペアンプをうまく  
利用すると  
いろんな使い方が  
できるんだヨ」

40 図の回路は、オペアンプ出力を電力制御回路に加え、モータをコントロールする回路です。

この回路では  $R_1$  と  $R_2$  にそれぞれ  $1\text{ [k}\Omega\text{]}$  と  $10\text{ [k}\Omega\text{]}$  がついているから、増幅度が10倍となっており、 $0.5\text{ [V]}$  の入力電圧を加えると出力電圧は(ア) \_\_\_\_\_  $\text{[V]}$  となり、また、 $-0.5\text{ [V]}$  の入力電圧を加えると出力電圧は(イ) \_\_\_\_\_  $\text{[V]}$  となって、モータは正逆にコントロールされます。



(ア)  $-5$

(イ)  $+5$

「どうも ご苦労さん  
でした」

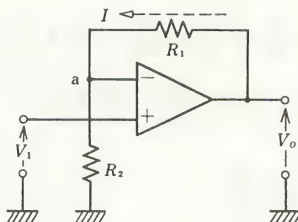
「これで  
オペアンプ活用法の基本は  
充分理解できたはずですよ。  
これから、自信をもっ  
て、オペアンプ回路にも  
取り組んでいって下さい」

# オペアンプ応用基本回路

## 非反転増幅器

入力と同相で  $\left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right)$  倍の出力が得られる。

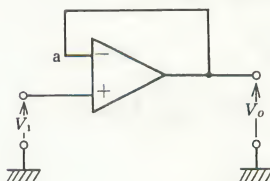
- 点 a の電位 =  $V_1$
- $I = \frac{V_1}{R_2}$
- $V_o = V_1 + IR_1 = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) V_1$



## バッファ(電圧フォロフ)

入力抵抗が非常に大きく、出力抵抗が非常に小さい増幅度 1 の回路。

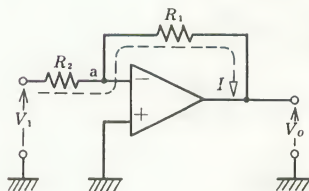
- 点 a の電位 =  $V_1$
- $V_o = V_1$



## 反転増幅器

入力と逆相の  $\frac{R_1}{R_2}$  倍の出力が得られる。

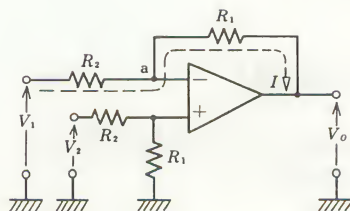
- 点 a の電位 = 0 [V]
- $I = \frac{V_1}{R_2}$
- $V_o = -IR_1 = -\frac{R_1}{R_2} V_1$



## 差動増幅器

$(V_2 - V_1)$  を  $\frac{R_1}{R_2}$  倍した出力が得られる。

- 点 a の電位 =  $\frac{R_1}{R_1 + R_2} V_2$
- $I = \frac{V_1 - \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_2}{R_2}$
- $V_o = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_2 - IR_1 = \frac{R_1}{R_2} (V_2 - V_1)$

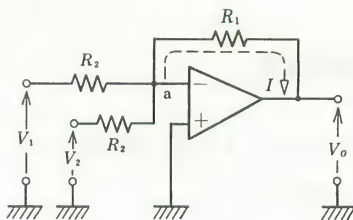




## 加 算 器

入力電圧  $V_1$ ,  $V_2$  を加算した出力が得られる。

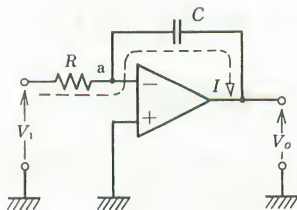
- 点 a の電位 = 0 [V]
- $I = \frac{V_1}{R_2} + \frac{V_2}{R_2} = \frac{1}{R_2} (V_1 + V_2)$
- $V_o = -IR_1 = -\frac{R_1}{R_2} (V_1 + V_2)$



## 積 分 器

入力電圧を積分した出力が得られる。

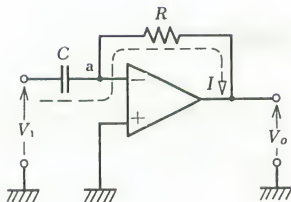
- 点 a の電位 = 0 [V]
- $I = \frac{V_1}{R}$
- $V_o = \frac{1}{C} \int Idt = \frac{1}{CR} \int V_1 dt$



## 微 分 器

入力電圧を微分した出力が得られる。

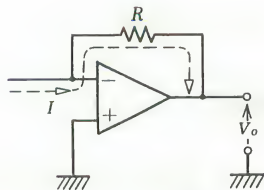
- 点 a の電位 = 0 [V]
- $I = \frac{dQ}{dt} = C \frac{dV}{dt}$
- $V_o = -IR = -CR \frac{dV}{dt}$



## I - V 変換器

入力電流に応じた出力電圧が得られる。

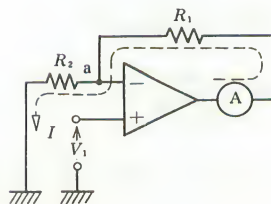
- 点 a の電位 = 0 [V]
- $V_o = -IR$



## V - I 変換器

入力電圧に応じた出力電流が得られる。

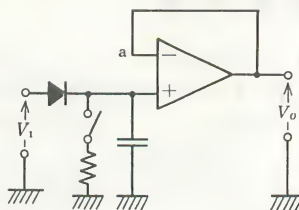
- 点 a の電位 =  $V_1$
- $I = \frac{V_1}{R_2}$



## ピークホールド

入力電圧の最大値に応じた出力が得られる。

- 点 a の電位 =  $V_{1\max}$
- $V_o = V_{1\max}$

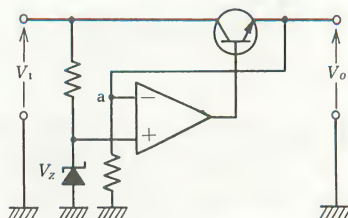


## 定電圧電源

入力電圧が変動しても、 $V_z$  の電圧値に応じた出力が得られる。

(ただし  $V_1 \geq V_z$  の場合)

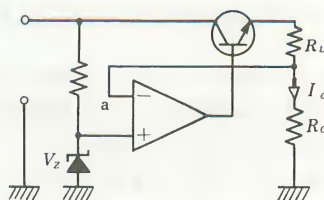
- 点 a の電位 =  $V_z$
- $V_o = V_z$



## 定電流電源

$R_L$  の値が変化しても、 $R_L$  には  $\frac{V_z}{R_o}$  の電流が流れる。

- 点 a の電位 =  $V_z$
- $I_o = \frac{V_z}{R_o}$



## 練習問題

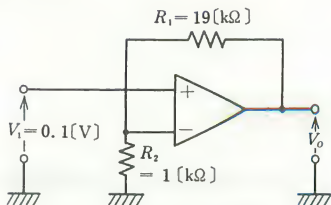
1 つぎの文章の \_\_\_\_\_ の中に適する言葉を入れ、文章を完成しなさい。

- (1) オペアンプに負帰還をかけた回路では、出力電圧が帰還されて、差動入力電圧がほぼ(ア) \_\_\_\_\_ [V]とみなせるような値になります。

この現象を(イ) \_\_\_\_\_ といっています。

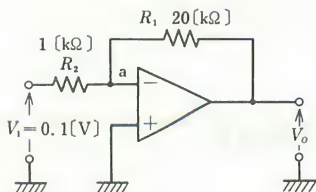
- (2) 図の回路では、抵抗  $R_2$  に生じる電圧降下が(ア) \_\_\_\_\_ [V]となり、また、 $R_1$  や  $R_2$  に流れる電流は(イ) \_\_\_\_\_ [mA] となります。

そして、出力電圧は(ウ) \_\_\_\_\_ [V]となります。



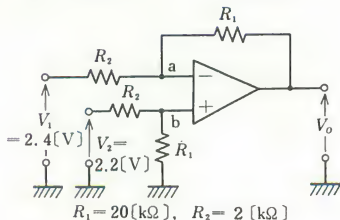
2 図の回路について、つぎの問いに答えなさい。

- (1) 図の回路はなんという増幅器ですか。  
 (2) 点 a の電位は何ボルトになりますか。  
 (3)  $R_1$ ,  $R_2$  にはそれぞれ何ミリ・アンペアの電流が流れますか。  
 (4) 出力電圧は何ボルトになりますか。



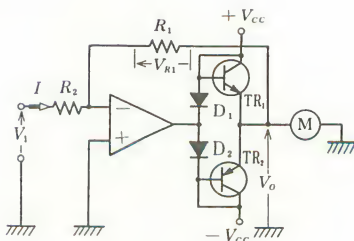
3 図の回路について、つぎの問いに答えなさい。

- (1) この回路はなんという増幅器ですか。  
 (2) 点 b の電位  $V_b$  を求めなさい。  
 (3) 点 a の電位  $V_a$  を求めなさい。  
 (4) 点 a に接続されている  $R_1$ ,  $R_2$  にはそれぞれ何ミリ・アンペアの電流が流れますか。  
 (5)  $V_o$  は何ボルトになりますか。



4 図の回路について、つぎの問いに答えなさい。

- (1)  $R_2$  に流れる電流  $I$  はどのような式で示されますか。  
 (2)  $R_1$  での電圧降下  $V_{R1}$  はどのような式で示されますか。  
 (3) 電圧  $V_o$  はどのような式で示されますか。



# 12. 応 用 回 路

一般に利用されている電子制御の応用事例について、簡単なものから配列しています。

いままでの学習の総まとめとして、また、自分で何かをつくろうとするときの参考として活用してください。

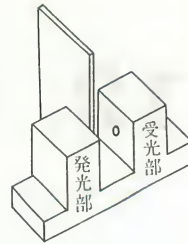


## 1

## 光を利用した物体の検出

## (1) 動作概要

- ① 発光部と受光部との間を物体が通過して光をしゃ断することによって、物体を検出します。
- ② 出力端子の電圧は、光がしゃ断されているときには約 0 [V]、そうでないときには約 5 [V] になります。

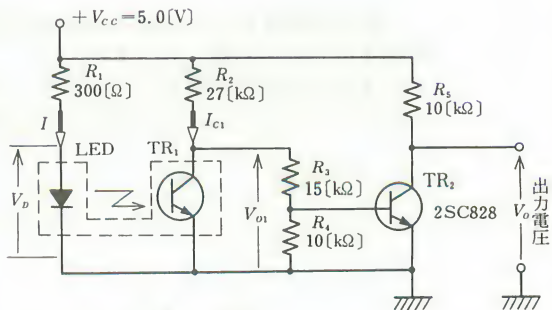


## (2) 回路概要

- ① 受光部にはホトトランジスタ ( $TR_1$ )、発光部には発光ダイオード (LED) を用いています。
- ② 発光ダイオードとはダイオードの一種で、十数ミリ・アンペア程度の順方向電流を流すと発光するという半導体素子です。

順方向電流を流しているときの発光ダイオード両端の電圧  $V_D$  は約 2 [V] になります。

- ③ 発光ダイオードからの光をホトトランジスタで受け、その出力をトランジスタ ( $TR_2$ ) で増幅しています。



## (3) 回路動作

- ① 発光ダイオードの電圧降下  $V_D$  を 2 [V] とすると、発光ダイオードにはつぎのような電流  $I$  が流れて点灯します。

$$I = \frac{V_{cc} - V_D}{R_1} = \frac{5 - 2}{300} = 10 \text{ [mA]}$$

- ② 物体が光をしゃ断していないときはホトトランジスタに光がはいり、コレクタ電流  $I_{C1}$  が流れて、 $V_{O1}$  が約 0 [V] になります。

したがって、 $TR_2$  のベース電流も流れず、出力電圧  $V_o$  は約 5 [V] になっています。

- ③ 物体が光をしゃ断すると、ホトトランジスタには光がはいらなくなり、 $I_{C1}$  が流れず、 $V_{O1}$  が約 5 [V] になります。

したがって、 $TR_2$  にはベース電流が流れ、コレクタ電流も流れて、出力電圧は約 0 [V] になります。



## 2

## 自動停止つき灯油供給ポンプ

## (1) 動作概要

- ① ONスイッチを押すとポンプP

が働き、灯油が供給されます。

灯油供給が完了すると自動的に  
ポンプは停止します。

- ② OFFスイッチを押すことによって、手動でもポンプを停止することができます。

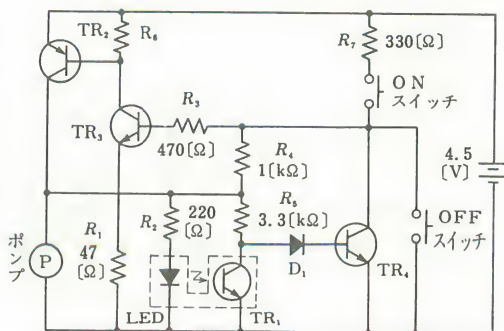
## (2) 回路概要

- ① 灯油供給完了の検出器は、

発光ダイオード(LED)と  
ホトトランジスタ( $TR_1$ )を  
用いて構成しています。

- ② LED,
- $TR_1$
- ,
- $D_1$
- ,
- $TR_4$

の部分は、自動停止動作を  
行うための回路です。



## (3) 回路動作

## ① 基本動作

- ONスイッチを押すと  $R_7$ 、ONスイッチ、 $R_3$ を通じて  $TR_3$ のベース電流が流れ、 $TR_3$ がONになります。
- $TR_3$ がONになると  $TR_2$ のベース電流が  $TR_3$ 、 $R_1$ を通じて流れ、 $TR_2$ がONになってポンプが働きます。
- 一方、 $TR_2$ がONになると  $TR_2$ 、 $R_4$ 、 $R_3$ を通して  $TR_3$ のベース電流が供給されるようになり、ONスイッチが離れても  $TR_3$ のベース電流が流れ続け、 $TR_3$ はONを保持しますから、ポンプは駆動され続けます。
- OFFスイッチを押すと  $TR_3$ のベース電流が流れなくなり、 $TR_3$ 、 $TR_2$ ともにOFFとなって、モータは停止します。

## ② 自動停止動作

- ONスイッチを押したときには  $TR_3$ 、 $TR_2$ がONとなり、ポンプが駆動すると同時に  $R_2$ を通じて発光ダイオードが点灯し、その光がホトトランジスタにはいって、ホトトランジスタはONとなり、 $TR_4$ のベース電流が流れず、 $TR_4$ はOFFになっています。
- しかし、灯油がはいって発光ダイオードとホトトランジスタ間の光をさえぎるようになると、ホトトランジスタがOFFとなり、 $R_5$ 、 $D_1$ を通じて  $TR_4$ のベース電流を流すようになって  $TR_4$ がONとなるので、OFFスイッチを押したのと同じことになり、ポンプは停止します。

## 3 写真焼付機の露光時間制御回路

## (1) 動作概要

- ① スイッチSを入れてから一定時間だけランプが点灯し、感光紙を露光します。
- ② 露光時間は自由に設定できます。



## (2) 回路概要

## ① 可変抵抗 VR

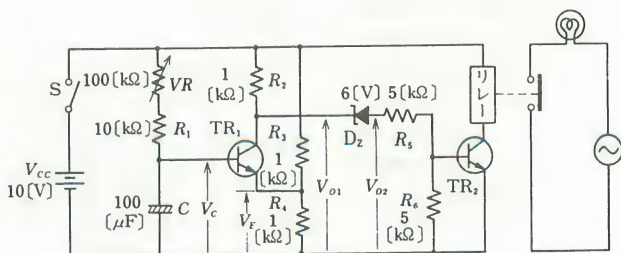
を変化してコンデンサの充電速度を変化させることにより、露光時間が調整できるようになります。

## ② スイッチSを

入れるとTR<sub>2</sub>が

ONになってリレーが駆動され、ランプが点灯します。

そして、一定時間が経過すると、TR<sub>1</sub>が動作してTR<sub>2</sub>がOFFとなり、ランプは消灯します。



## (3) 回路動作

- ① スイッチSを入れるとVR、R<sub>1</sub>を通じてコンデンサが充電されていきます。

しかし、初期の段階ではコンデンサがまだ充電されておらず、TR<sub>1</sub>はOFFを持続します。

- ② したがって、スイッチを入れたときはV<sub>o1</sub>が約10[V]となり、TR<sub>2</sub>がONとなってリレーが駆動され、ランプが点灯します（ツェナ・ダイオードには6[V]のものを用いていますから、V<sub>o1</sub>が10[V]のときはV<sub>o2</sub>は4[V]になります）。

- ③ その後、時間経過に従ってコンデンサが充電され、V<sub>c</sub>の値がTR<sub>1</sub>のエミッタ電圧V<sub>E</sub>よりも大きくなると、TR<sub>1</sub>のコレクタ電流が流れてV<sub>o1</sub>が低下します。

$$\left( \begin{array}{l} \text{TR}_1 \text{のエミッタ電圧 } V_E \text{は、つぎのようになっています。} \\ V_E = \frac{R_4}{R_3 + R_4} V_{cc} = 5 \text{ [V]} \end{array} \right)$$

- ④ V<sub>o1</sub>が低下すると、TR<sub>2</sub>のベース電流が流れなくなり、TR<sub>2</sub>がOFFとなってリレーが駆動されなくなり、ランプが消灯します。

## 4

## 過電流保護付き安定化電源回路

## (1) 動作概要

- ① 整流出力電圧  $V_1$  が変動しても、一定電圧の安定した直流電圧が得られます。
- ② 負荷回路に異常があつて負荷電流  $I_L$  が大きくなりすぎると、自動的に出力電圧が0[V]となつて、過電流が流れるのを防ぎます。

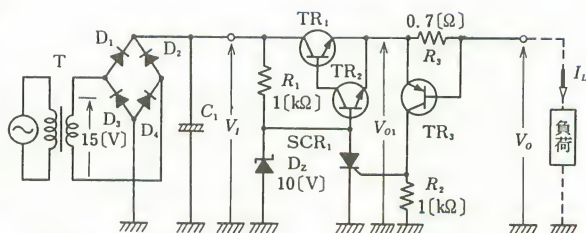


## (2) 回路概要

- ① ダイオード  $D_1 \sim D_4$ 、コンデンサ  $C_1$  および変圧器  $T$  は、電源整流回路を構成しています。

- ②  $R_1$ 、 $D_2$ 、 $TR_1$ 、 $TR_2$  は電圧安定化回路を構成しています。

- ③  $TR_3$ 、 $R_3$ 、 $R_2$ 、 $SCR_1$  は過電流保護回路を構成しています。



## (3) 回路動作

- ① ツェナ・ダイオードの電圧が10[V]ですから、出力電圧  $V_{o1}$  は負荷電流  $I_L$  に関係なく、 $V_{o1} = 10[V] + V_{BE2} = 10.7[V]$  になります。
  - $V_{o1}$  が10.7[V]よりも低くなりかけると  $TR_2$  のベース電流が増加し、 $TR_2$ 、 $TR_1$  のコレクタ電流も増加して、出力電圧が上昇する方向に働きます。
  - また、 $V_{o1}$  が10.7[V]よりも高くなりかけると  $TR_2$  のベース電流が減少し、 $TR_2$ 、 $TR_1$  のコレクタ電流も減少して、出力電圧が低下する方向に働きます。
- ②  $R_3$  の値は小さく、通常の負荷電流によってはほとんど電圧降下を起こしませんから、出力電圧  $V_o$  は10.7[V] になります。
- ③ 負荷電流  $I_L$  が、負荷の異状で非常に大きくなり、1[A]程度以上になると、 $R_3$  での電圧降下が0.7[V]以上になり、 $TR_3$ 、 $SCR_1$  がONになります。
 

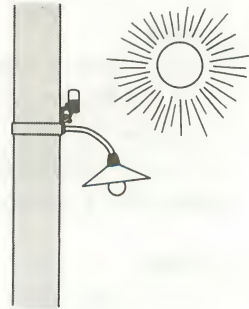
$SCR_1$  がONになると、ツェナ・ダイオード両端の電圧が約0[V]になり、 $TR_2$ 、 $TR_1$  をOFFにして、出力電圧をほぼ0[V]にします。
- ④ そして、 $SCR_1$  がONになったとき、 $R_1$  を通じて  $SCR_1$  を流れる電流の値を保持電流値以上にしておくと、 $SCR_1$  はON状態が保持されます。
 

したがって出力電圧が0[V]となり、 $R_3$  での電圧降下がなくなっても、出力電圧は0[V]を保持します。
- ⑤ 負荷電流を1[A]以上流れないようにして電源を一度切り、 $SCR_1$  をOFFにして再びONにすると、もとの状態にもどります。

## 5 街路灯の自動点滅回路

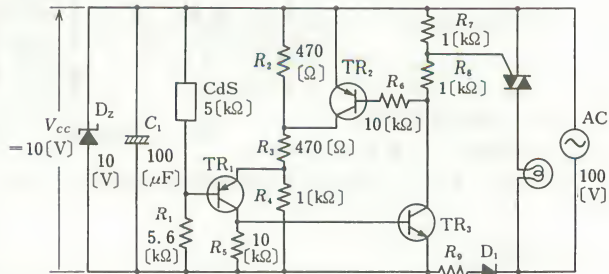
## (1) 動作概要

- ① 周囲の明るさを検出し、暗くなれば自動的にランプが点灯します。
- ② すこし明るさが変動した程度ではランプが点滅を繰り返さないように、シュミット・トリガ回路が利用されています。



## (2) 回路概要

- ① 交流 100[V] の電圧を  $D_1$  で整流し、 $D_2$ 、 $C_1$ 、 $R_9$  で  $D_2$  両端に 10[V] の直流電圧  $V_{cc}$  を得ています。
- ②  $TR_1$ 、 $TR_2$ 、 $TR_3$  の部分はシュミット・トリガ回路を構成しています。
- ③  $TR_1$  のエミッタの電圧は、 $TR_2$  が OFF のとき 10[V] の電圧を  $R_2$ 、 $R_3$ 、 $R_4$  で分圧した値になっています。



## (3) 回路動作

- ① 周囲が暗くなると CdS の抵抗が大きくなり、CdS 両端の電圧降下が大きくなって、 $TR_1$  が ON になります。
- ②  $TR_1$  が ON になると、 $R_5$  での電圧降下で  $TR_3$  が ON となり、 $TR_3$  が ON になると  $R_7$  の電圧降下でトライアックが ON となって、ランプが点灯します。  
また、 $TR_3$  が ON になると  $TR_2$  も ON になり、 $R_2$  での電圧降下が 0 になって  $TR_1$  のエミッタ電位が上昇し、この状態が保持されます。  
そして、周囲がすこしぐらい明るくなってもランプは消灯しなくなります。
- ③ 周囲がかなり明るくなり、CdS の抵抗が小さくなって、 $TR_1$  のエミッタ電位よりもベース電位のほうが高くなると、 $TR_1$ 、 $TR_3$ 、 $TR_2$  の順に OFF となり、もとの状態にもどってランプは消灯します。

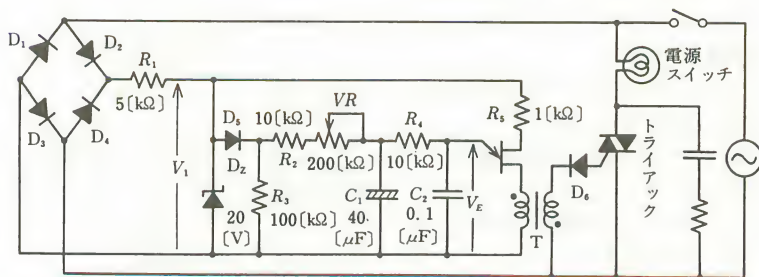
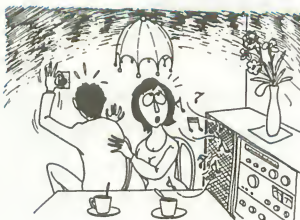


6

## ソフトスタートのランプ調光回路

## (1) 動作概要

- ① 電源スイッチをONにすると、時間が経過するにつれて徐々にランプが明るくなります。
- ② 電源スイッチをONにしてからランプが徐々に明るくなる速度を自由に調整できます。



## (2) 回路動作

- ① 電源スイッチをONにすると、交流100[V]の電圧が $D_1 \sim D_4$ で全波整流され、 $R_1$ 、 $D_2$ によって一定電圧値以上がカットされますから、電圧 $V_1$ は図のようになります。
- ② 電圧 $V_1$ は $R_2$ と $VR$ を通じて $C_1$ を充電し、 $C_1$ の両端の電圧 $V_{C1}$ は図のように徐々に上昇していきます。

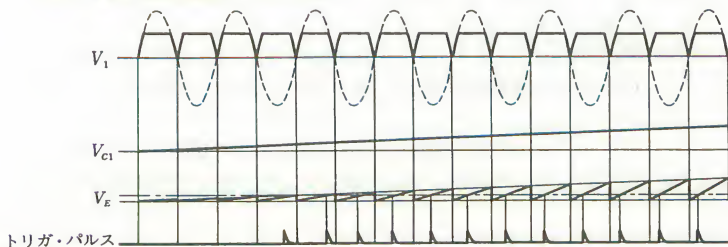
この $V_{C1}$ の上昇する速度は、 $VR$ を変化することによって自由に調整できます。

- ③ 電圧 $V_{C1}$ は $R_4$ を通じて $C_2$ を充電し、UJTのエミッタ電圧 $V_E$ を上昇させます。
- ④ 電源スイッチ投入直後の $V_{C1}$ が低いときは、 $C_2$ への充電電流も少なく、 $V_E$ の電圧上昇もほとんどありません。

しかし、時間が経過して $V_{C1}$ が高くなってくると、 $V_E$ も高い電圧まで上昇してきます。

- ⑤ そして、UJTがONになるレベルが図の一点鎖線のところであるとすると、トリガ・パルスは図のようになって、電源投入後の時間経過に従って早いタイミングで発生するようになり、ランプは明るくなっていきます。

(わかりやすくするために、 $V_E$ およびトリガ・パルスは発振波形を示していません)が、実際には発振しています。





## 7 入力電圧判定回路

## (1) 動作概要

入力電圧に応じて、その大きさを判定し、つぎのようにそれぞれのLEDを点灯表示します。

- $V_I < V_{S1}$  .....  $LED_1$  が点灯
- $V_{S1} < V_I < V_{S3}$  .....  $LED_2$  が点灯
- $V_I > V_{S3}$  .....  $LED_3$  が点灯



## (2) 回路概要

- ① オペアンプはそれぞれ10[V]の単一電源で動作させています。
- ② オペアンプはそれぞれ比較器として使用しています。
- ③  $V_{S1}$ ,  $V_{S2}$ ,  $V_{S3}$  の値はそれぞれつぎのようになります。

$$V_{S1} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{CC} = 1[V]$$

$$V_{S2} = \frac{R_4}{R_3 + R_4} V_{CC} = 1[V]$$

$$V_{S3} = \frac{R_6}{R_5 + R_6} V_{CC} = 5[V]$$

## (3) 回路動作

- ①  $V_I$  が  $V_{S1} = 1[V]$  より低いときは  $V_{O1}$ ,  $V_{O3}$  がそれぞれつぎのようになります,  $LED_1$  が点灯し,  $LED_3$  は点灯しません。

$$V_{O1} = +10[V], V_{O3} = 0[V]$$

- ② そして,  $V_{O1} = +10[V]$ ,  $V_{O3} = 0[V]$  になると  $V_{I2}$  の値がつぎのようになります,

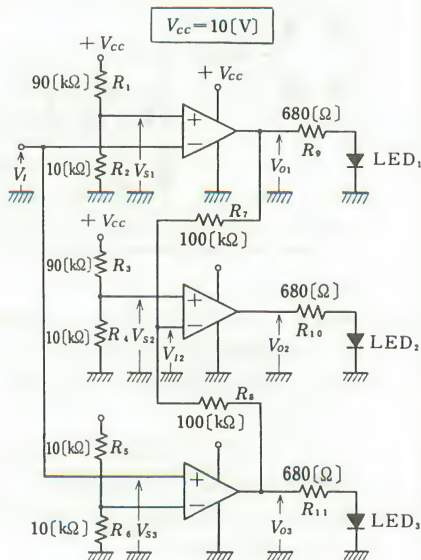
$V_{O2}$  の値も 0[V] になりますから,  $LED_2$  も点灯しません。

つまり,  $V_I$  が 1[V] より低いときは  $LED_1$  だけ点灯することになります。

$$V_{I2} = \frac{R_8}{R_7 + R_8} V_{O1} = 5[V]$$

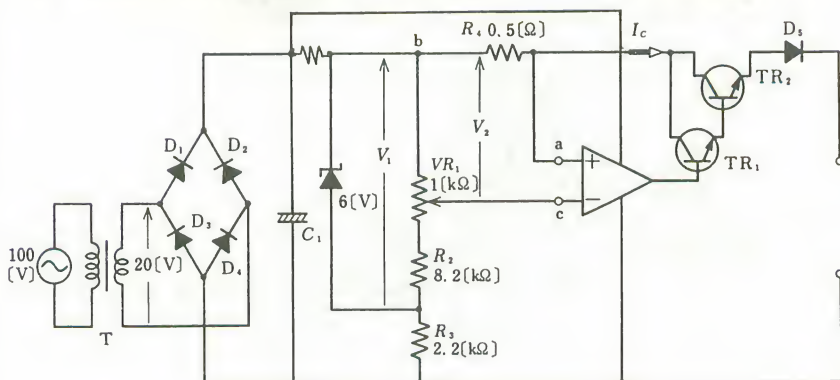
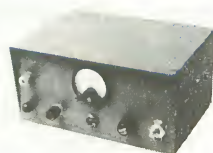
- ③ 同様にして,  $V_I$  がつぎの状態のときには, それぞれつぎのLEDが点灯するようになります。

- $V_{S1} < V_I < V_{S3}$  のとき .....  $V_{O1} = 0[V]$ ,  $V_{O3} = 0[V]$ ,  $V_{O2} = 10[V] \Rightarrow LED_2$  のみ点灯
- $V_I > V_{S3}$  のとき .....  $V_{O1} = 0[V]$ ,  $V_{O3} = 10[V]$ ,  $V_{O2} = 0[V] \Rightarrow LED_3$  のみ点灯



## (1) 動作概要

- ① バッテリーに一定電流で充電が行われます。
- ② バッテリーへの充電電流は任意に調整できます。



## (2) 回路概要

- ① T, D<sub>1</sub>~D<sub>4</sub>, C<sub>1</sub>は電源整流回路を構成しています。
- ② V<sub>1</sub>の値はツェナ・ダイオードによって6[V]になっています。
- ③ TR<sub>1</sub>, TR<sub>2</sub>はオペアンプ出力でI<sub>c</sub>を制御するためのものです。
- ④ バッテリーへの充電電流I<sub>o</sub>はVR<sub>1</sub>によって自由に設定でき、ほぼつぎの値になります。

$$I_o = \frac{V_2}{R_4} = \frac{V_2}{0.5[\Omega]}$$

## (3) 回路動作

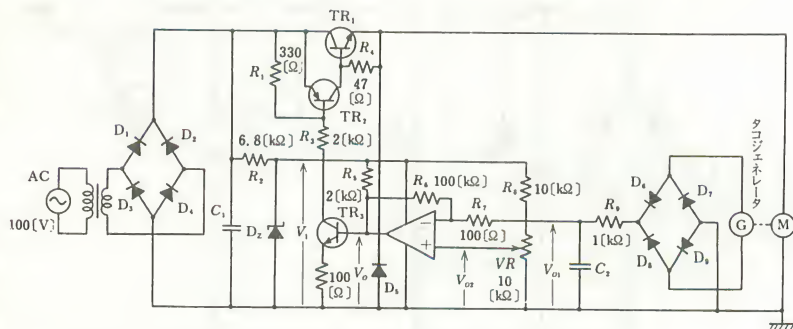
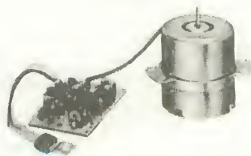
- ① オペアンプはつぎのような動作をして、点ba間の電圧と点bc間の電圧が等しくなるように働きます。
  - 点bc間の電圧よりも点ba間の電圧が小さければ、点cの電位よりも点aの電位のほうが高くなり、オペアンプの出力電圧が上昇し、TR<sub>1</sub>, TR<sub>2</sub>のコレクタ電流が増加してR<sub>4</sub>での電圧降下が大きくなって点ba間の電圧が増加します。
  - 点bc間の電圧よりも点ba間の電圧が大きければ、点cの電位よりも点aの電位のほうが低くなり、オペアンプの出力電圧が低下し、TR<sub>1</sub>, TR<sub>2</sub>のコレクタ電流が減少してR<sub>4</sub>での電圧降下が小さくなって点ba間の電圧が低下します。
- ② つまり、オペアンプとTR<sub>1</sub>, TR<sub>2</sub>は、R<sub>4</sub>に $\frac{V_2}{R_4}$ の電流が流れるように動作します。
 

V<sub>2</sub>の値を1[V]に設定すると、R<sub>4</sub>には2[A]の電流が流れるようになります。
- ③ R<sub>4</sub>に流れる電流は、オペアンプへの電流、TR<sub>1</sub>, TR<sub>2</sub>のベース電流を無視すると、この電流がそのままバッテリーへの充電電流になります。

## 9 直流モータの定速度制御回路

## (1) 動作概要

- ① モータの回転速度を自由に設定できます。
- ② そして、ある値に設定すると、その設定値に従って定速度で回転します。



## (2) 回路概要

- ① モータの回転速度の検出は、モータのシャフトにタコジェネレータ(G)を直結し、その発電電圧で検出しています(タコジェネレータとは一種の小形発電機です)。
- ②  $D_6 \sim D_9$ ,  $R_9$ , および  $C_2$  は、タコジェネレータの発電電圧を整流・平滑するためのものです。

モータの回転速度が速くなると  $V_{01}$  は上昇し、遅くなると  $V_{01}$  は低下します。

- ③  $VR$  は回転速度を設定するためのもので、オペアンプは検出電圧  $V_{01}$  と設定電圧  $V_{02}$  の差の電圧を増幅します。
- ④  $TR_1$ ,  $TR_2$ ,  $TR_3$  はオペアンプ出力の電力制御回路です。
- ⑤  $R_2$  およびツェナ・ダイオード  $D_2$  で  $V_1$  の値を  $12[V]$  にしています。
- ⑥  $D_1 \sim D_4$  および  $C_1$  は電源整流回路を構成しています。

## (3) 回路動作

- ① 回転速度が設定値よりも速くなると、タコジェネレータの発電電圧が上昇し、 $V_{02}$  よりも  $V_{01}$  のほうが高くなってきます。
- ② 回転速度が設定値よりも遅くなると、タコジェネレータの発電電圧が低下し、 $V_{02}$  よりも  $V_{01}$  のほうが低くなってきます。
- ③  $V_{01}$ ,  $V_{02}$  の値によって、オペアンプの出力電圧  $V_o$  はつぎのようになります。
  - 回転速度が遅く、 $V_{01}$  が  $V_{02}$  より低い場合は、オペアンプの出力電圧が上昇します。
  - 回転速度が速く、 $V_{01}$  が  $V_{02}$  より高い場合は、オペアンプの出力電圧が低下します。

- ④ 回転速度が設定値からズレてくると、つぎのような動作をして速度が修正され、定速度回転をするようになります。

- 回転速度が減少し、オペアンプ出力が上昇すると、TR<sub>3</sub>のベース電流が増加し、TR<sub>3</sub>、TR<sub>2</sub>、TR<sub>1</sub>のコレクタ電流が増加し、モータに流れる電流が増加して、回転速度が上昇する方向に働きます。
- 回転速度が増加し、オペアンプ出力が低下すると、TR<sub>3</sub>のベース電流が減少し、TR<sub>3</sub>、TR<sub>2</sub>、TR<sub>1</sub>のコレクタ電流が減少し、モータに流れる電流が減少して、回転速度が低下する方向に働きます。





# 練習問題の解答

## 1. 電子制御と検出器

- 1 (1) (ア) (2) (イ) (3) (ウ) (4) (イ) (5) (ウ) (6) (ア)  
 2 (1) サーミスタ (2) CdS (3) 差動変圧器  
 3 (1) (ウ) (2) (イ) (3) (ウ) (4) (ウ) (5) (ア) (6) (ア)  
 4 (1)  $R_{TH}=1000[\Omega]$   $I=0.007[A]$   $V=3.5[V]$   
 (2)  $R_{TH}=400[\Omega]$   $I=0.0175[A]$   $V=5[V]$

## 2. 電子制御の構成とトランジスタ

- 1 (1) (ア) コレクタ (イ) ベース (ウ) エミッタ (エ) NPN  
 (オ) コレクタ (カ) ベース (キ) エミッタ (ク) PNP  
 (2) NPN (3) 電流増幅率 (4) 0.6 (または0.7)  
 2 (ア) 5[mA] (イ) 10[mA] (ウ) 15[mA]  
 3 (1) 増加する (2) 0.6[V] (または0.7[V]) (3) 増加する

## 3. 電圧増幅

- 1 (1)  $R_E$  (2)  $V_{RE}=V_I-0.7$  (3) 9倍 (4)  $I_A \gg I_B$  (または  $I_A > 10I_B$ )  
 (5)  $R_E(1+h_{FE}) \gg R_{TH} \cdot R_A / (R_{TH}+R_A)$   
 2  $V_{RE}=V_I-0.7=2.7-0.7=2[V]$   $I_E=V_{RE}/R_E=1[mA]$   
 3  $V_{RE}=V_I-0.7=3.7-0.7=3[V]$   $R_E=V_{RE}/I_E=0.6[k\Omega]$   
 4 (1)  $V_{RE}=V_I-0.7=1.3[V]$   $I_E=V_{RE}/R_E=0.65[mA]$   $I_C \doteq I_E=0.65[mA]$   
 (2)  $V_I=1.7[V]$  のとき  $\Rightarrow V_{RE}=1[V]$   $I_C \doteq I_E=0.5[mA]$   $V_O=V_{CC}-I_C R_C=10[V]$   
 $V_I=2.2[V]$  のとき  $\Rightarrow V_{RE}=1.5[V]$   $I_C \doteq I_E=0.75[mA]$   $V_O=V_{CC}-I_C R_C=7.5[V]$   
 (3)  $A=\Delta V_O/\Delta V_I=R_C/R_E=5$  倍  
 5  $V_{RE}=I_E \cdot R_E \doteq I_C \cdot R_E=2[V]$   $V_I=V_{RE}+0.7=2.7[V]$   
 6  $\circ$  CdSの抵抗が15[k $\Omega$ ]のときに  $I_C \doteq 0$  するには、この状態で  $V_I$  を0.7[V]にすればよい。

$$10[V] \times \frac{R_A}{R_A+15[k\Omega]} = 0.7[V] \quad \therefore R_A = \frac{10.5}{9.3} [k\Omega] \doteq 1.13[k\Omega]$$

$\circ$  CdSの抵抗 ( $R$ ) が10[k $\Omega$ ],  $R_A=1.13[k\Omega]$ のときの  $V_I$  はつぎのようになる。

$$V_I = V_{CC} \cdot \frac{R_A}{R_A+R} = 1.0[V]$$

$\circ$  この状態で  $I_C$  に5[mA]流すためには、 $R_E$ の値をつぎのようにすればよい。

$$V_{RE}=V_I-0.7=0.3[V] \quad R_E=V_{RE}/I_E \doteq V_{RE}/I_C=60[\Omega]$$

- 7  $V_E=6[V] \times 100[\Omega] / (500[\Omega] + 100[\Omega]) = 1[V]$   $\therefore V_I=1.7[V]$

## 4. 電力制御

- 1  $V_L=V_I-0.7=10[V]$   
 $I_L=V_L/R_L=1[A]$   
 $I_B=I_L/(1+h_{FE}) \doteq 10[mA]$   
 $P_L=I_L^2 \cdot R_L=10[W]$

2	$V_I$	$I_B$	$V_L$	$I_L$	$P_L$
	1.2[V]	0.5[mA]	0.5[V]	0.05[A]	0.025[W]
	5.7[V]	5[mA]	5.0[V]	0.5[A]	2.5[W]
	9.7[V]	9[mA]	9.0[V]	0.9[A]	8.1[W]

- 3 (1) ダーリントン接続 (2) 10000  
 (3)  $V_L = V_{C1} - 0.7 \times 2 = 18 \text{ [V]}$   
 $I_{B2} \doteq I_L / (h_{FE1} \cdot h_{FE2}) \quad I_L = 1 \text{ [A]} \quad \therefore I_{B2} \doteq 0.1 \text{ [mA]}$   
 4 (1) 実線 (2) 1 [V] (3) 入力電圧が  $\pm 0.7 \text{ [V]}$  の範囲ではモータが回転しない。

### 5. ON-OFF制御とシュミット・トリガ

- 1 (1) 少な (2) (ア) スイッチング (イ) 飽和 (ON) (3) シュミット・トリガ  
 2  $I_C = 10 \text{ [V]} / 100 \text{ [\Omega]} = 0.1 \text{ [A]} \quad I_B = I_C / h_{FE \text{ min}} = 1 \text{ [mA]} \quad \therefore 1 \text{ [mA]} \text{ 以上}$   
 3  $V_E = V_{CC} \cdot R_2 / (R_1 + R_2) = 2 \text{ [V]} \quad \therefore V_I = 2.7 \text{ [V]}$   
 $V_E = V_I - 0.7 = 5 \text{ [V]} \quad 5 \text{ [V]} = 10 \text{ [V]} \times R_2 / (R_2 + 800 \text{ [\Omega]}) \quad \therefore R_2 = 800 \text{ [\Omega]}$   
 4  $V_U = V_{CC} \times (R'_2 + R'_2) / (R_1 + R'_2 + R'_2) + 0.7 = 4.7 \text{ [V]}$   
 $V_L = V_{CC} \times R'_2 / (R_1 + R'_2) + 0.7 = 3.2 \text{ [V]}$

### 6. サイリスタとON-OFF制御

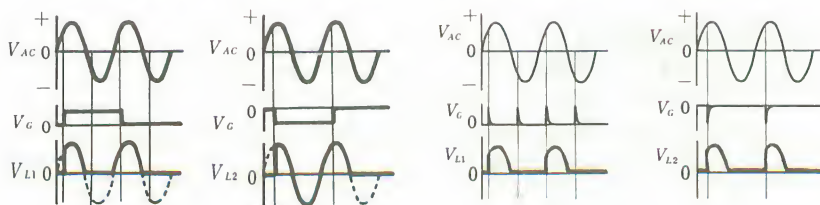
- 1 (1) (ア) カソード (イ) ゲート  
 (2) (ア) アノード (カソード) (イ) カソード (アノード)  
 (3) (ア) ゲート・トリガ (イ) 保持  
 2  $V_{I(\text{min})} = V_{GK(\text{max})} + I_{GK(\text{max})} \cdot R_G = 4.8 \text{ [V]} \quad 3 \text{ (イ)}$   
 4 5

(図 a の場合)

(図 b の場合)

(図 a の場合)

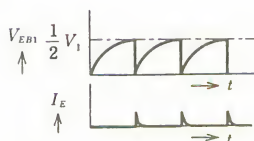
(図 b の場合)

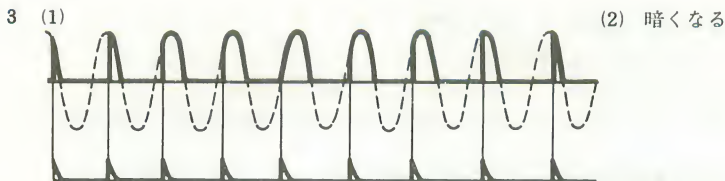


- 6 (1) シュミット・トリガ回路 (2) 4.7 [V] (3) 50 [W]  
 7 (1) 負 (2) 減少する (3) 駆動されない (電圧がかからない)

### 7. 位相制御 (I)

- 1 (1) 連続 (2) ゲート・トリガ (3) (ア)  $B_1$  (ベース 1)  
 (イ) スタンドオフ電圧比 (4) 谷電流  
 2 (1) ① 遅く ② (ア)  $EB_1$  (エミッタ・ベース 1) (イ)  $V_1 / R_1$   
 (2)





### 8. 位相制御 (Ⅲ)

- 1 (1) プログラマブル (2) (ア) AK (アノード・カソード) (イ) 谷電流  
(3) ブレークオーバー  
2 (1) 5.7[V] (2) 早くなる 3 (1) 減少する (2) 暗くなる  
4 (1) 明るくなる  
(2) ヒステリシス現象の軽減 (ランプが消えている状態から明るくしていく際に急激にある明るさになってしまうのを軽減するため)

### 9. オペアンプと比較機能

- 1 (1) (ア) 反転入力 (イ) 非反転入力 (2) (ア) 無限大 (イ) 0  
(3) オフセット  
2 (ア) -15[V] (イ) +15[V] (ウ) +15[V] (エ) -15[V]  
3 (1) オフセット補正 (2) 5[V]  
(3) (ア) 駆動されない (電圧がかからない) (イ) 駆動される (電圧がかかる)

### 10. オペアンプの活用法 (Ⅰ)

- 1 (1) (ア) 負帰還 (イ) 正帰還 (2) (ア) 正 (イ) 負 (3) (ア) 小 (イ) 大  
2 (1) 非反転入力端子の電圧  $V = -V_{cc} \cdot R_2 / (R_1 + R_2) = -5[V]$   $\therefore V_L = -5[V]$   
(2) 非反転入力端子の電圧  $V = +V_{cc} \cdot R_2 / (R_1 + R_2) = +5[V]$   $\therefore V_L = +5[V]$   
3 (1)  $V_U$  と  $V_L$  との電圧差が変化する。  
 $\circ R_2$  を小さくする  $\Rightarrow$  差が小さくなる  $\circ R_2$  を大きくする  $\Rightarrow$  差が大きくなる  
(2)  $V_U$  と  $V_L$  との中心値が移動する。

### 11. オペアンプの活用法 (Ⅲ)

- 1 (1) (ア) 0 (イ) イマジナル・ショート (2) (ア) 0.1 (イ) 0.1 (ウ) 2  
2 (1) 反転増幅器 (2) 0[V] (3) 0.1[mA] (4) 2[V]  
3 (1) 差動増幅器 (2)  $V_d = V_2 \cdot R_1 / (R_1 + R_2) = 2[V]$  (3) 2[V]  
(4)  $I = (V_1 - V_d) / R_2 = 0.2[mA]$  (5)  $V_o = V_a + V_{R1} = 2 - 4 = -2[V]$   
4 (1)  $I = V_1 / R_2$  (2)  $V_{R1} = IR_1$  (3)  $V_o = -V_{R1} = -IR_1 = -V_1 R_1 / R_2$

学習プログラム方式 末武国弘 (東京工業大学名誉教授)  
神奈川大学教授

編著代表者 中野 稔

執筆 神内英行  
藤塚 治  
光永浩志

編集 前川 寛  
久米 勇  
杉 英一 (技術本部)  
嶋崎 烈 (技術本部)

制御基礎講座 3

プログラム学習による 電子制御

---

昭和55年12月10日 初版発行  
昭和56年3月10日 2刷発行  
昭和56年7月3日 3刷発行  
昭和56年10月6日 4刷発行

定価 1,200 円

© 編著 松下電器産業株式会社  
製造・技術研修所

発行 松下電器産業株式会社

---

製作 科学情報社  
発売元

大阪市西区江戸堀1-21-3  
ソガベビル  
電話 大阪(448) 6530  
振替 大阪3 1509

書店発売 広済堂出版  
03(453)1201

3354-171071-2230 © 1980  
印刷 株式会社関西廣済堂



## 電気基礎講座

- |                 |     |        |        |
|-----------------|-----|--------|--------|
| 1. 直 流 編        | A 5 | 206ページ | 950円   |
| 2. 磁気・静電気編      | A 5 | 262ページ | 1,100円 |
| 3. 交 流 編        | A 5 | 270ページ | 1,100円 |
| 4. 電 気 回 路 編    | A 5 | 276ページ | 1,100円 |
| 5. 電 子 回 路 編 I  | A 5 | 230ページ | 1,000円 |
| 6. 電 子 回 路 編 II | A 5 | 310ページ | 1,200円 |

## 制御基礎講座

- |                      |     |        |        |
|----------------------|-----|--------|--------|
| 1. リレーシーケンス制御        | A 5 | 192ページ | 950円   |
| 2. 無接点シーケンス制御        | A 5 | 232ページ | 1,000円 |
| 3. 電 子 制 御           | A 5 | 304ページ | 1,200円 |
| 4. デジタル制御 (続刊)       |     |        |        |
| 5. マイクロコンピュータ制御 (続刊) |     |        |        |

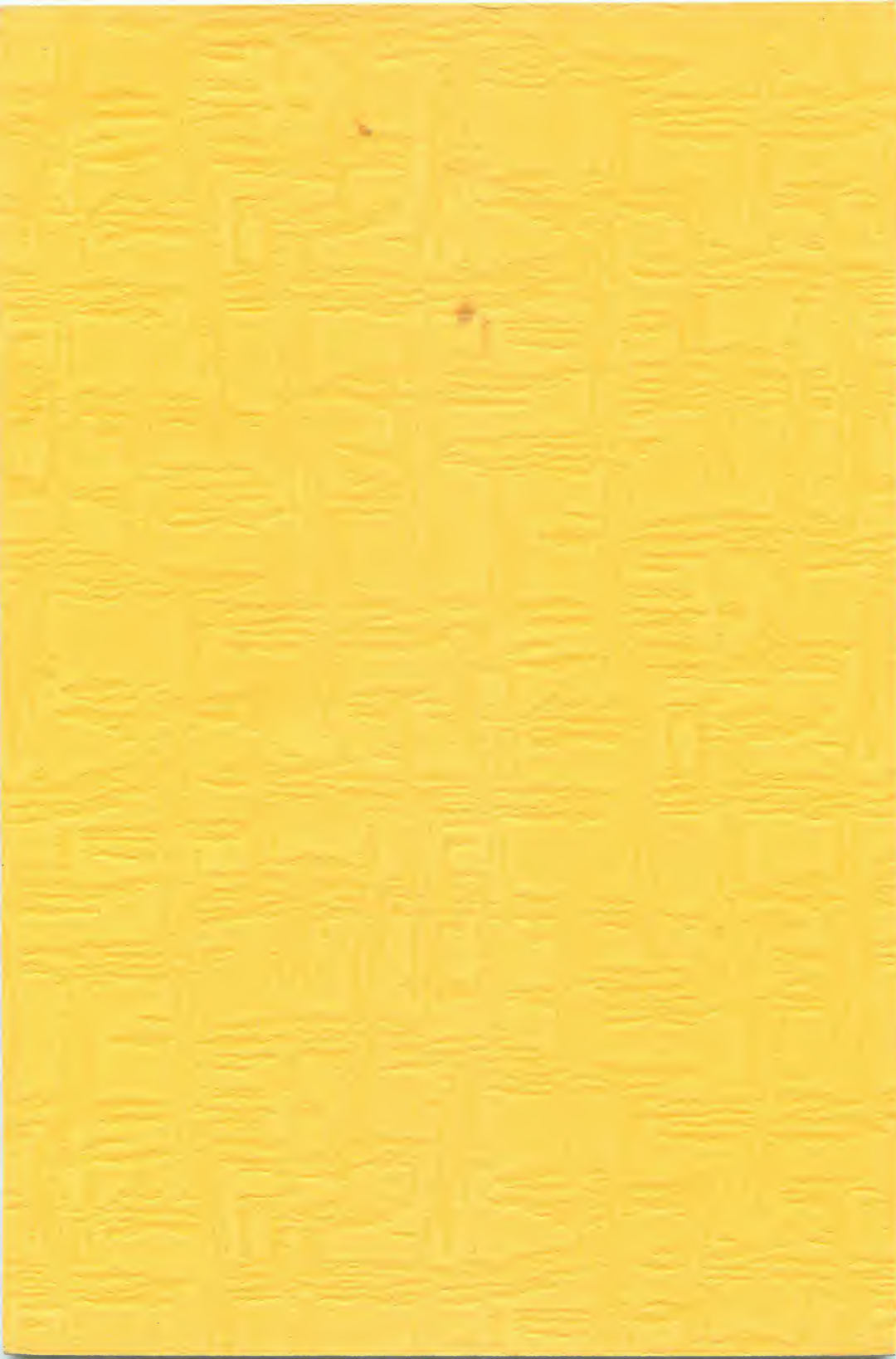
## 初歩設計製図講座

- |                      |     |        |        |
|----------------------|-----|--------|--------|
| 1. 図面の読みかた           | B 5 | 220ページ | 1,500円 |
| 2. 製 図 の 規 則 (続刊)    |     |        |        |
| 3. 初 歩 の 設 計 (続刊・仮題) |     |        |        |

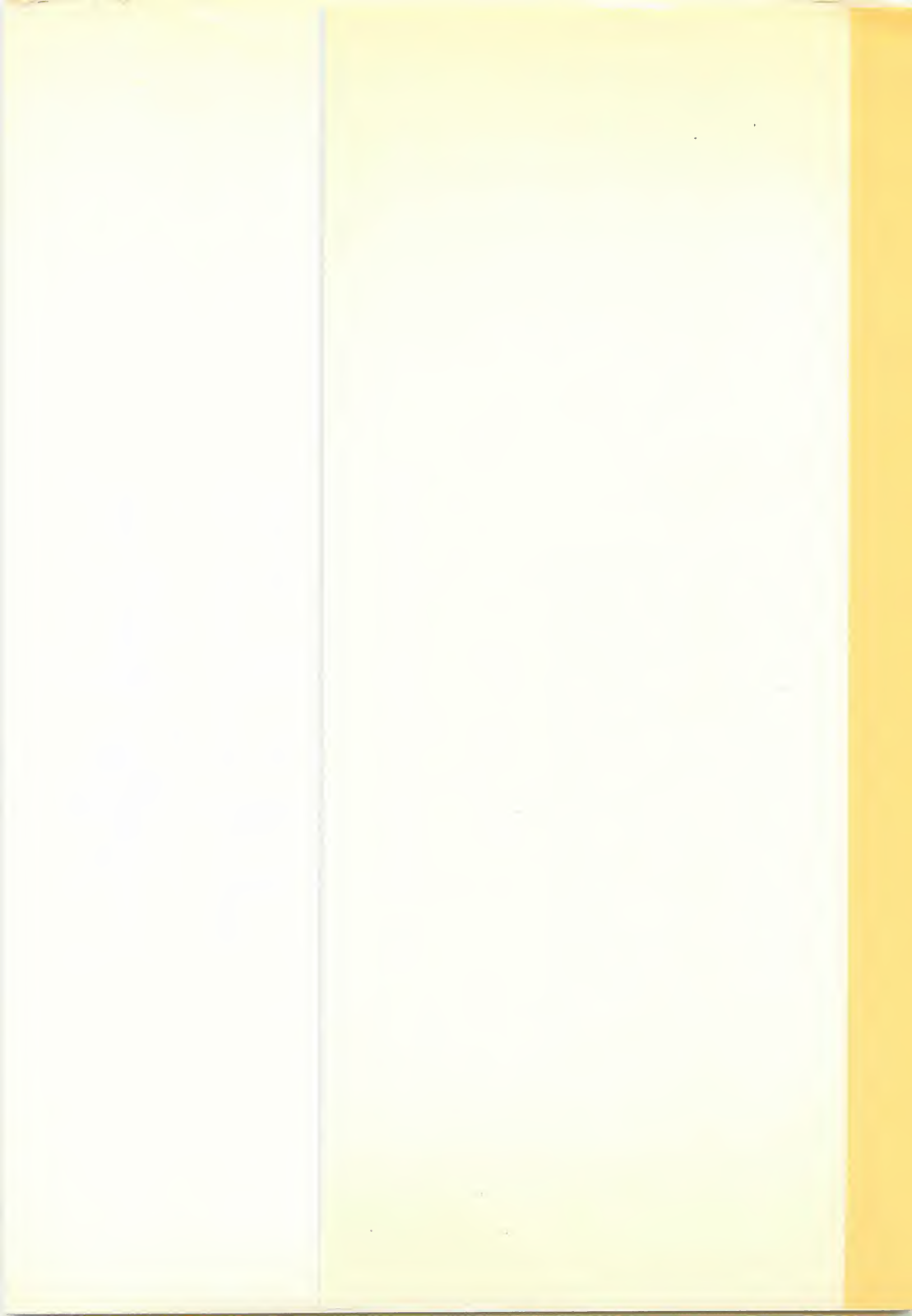












発売 広済堂出版 定価 1,200 円  
3354-171071-2230